SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET - ZAGREB

NEDJELJKO PERIĆ

AUTOMATSKA REGULACIJA II

TEORIJA AUTOMATSKE REGULACIJE II

UPUTE ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

Tema II: SISTEM REGULACIJE BRZINE VRTNJE



ZAGREB, 1978.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET - ZAGREB

NEDJELJKO PERIĆ

AUTOMATSKA REGULACIJA II

TEORIJA AUTOMATSKE REGULACIJE II

UPUTE ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

Tema II: SISTEM REGULACIJE BRZINE VRTNJE



ZAGREB, 1978.

Odobrenje Odbora za izdavačku djelatnost Skupštine Sveučilišta u Zagrebu
Broj 02—1702/1 od 11. 01. 1979

Cijena za studente Sveučilišta u Zagrebu
Din 44.–

Tisak: Sveučilišna naklada Liber—Zagreb, Trg maršala Tita 14
Broj 949/SL

S A D R Ž A J

P R E D G O V O R

Upute za laboratorijske vježbe na maketi sistema regulacije brzine vrtnje istosmjernog motora spadaju u nastavno gradivo predmeta "Automatska regulacija" II (III godina ESA) i predmeta "Teorija automatske regulacije" II (IV godina Elektronika, usmjerenje Automatika).

Polazeći od činjenice da se većina studenata elektronike po prvi put susreće s problematikom vezanom za regulaciju brzine vrtnje istosmjernog motora, smatrao sam da je potrebno u uvodnom dijelu detaljnije opisati regulacijska svojstva istosmjernog motora i tiristorskog usmjerivača.

Na laboratorijskoj maketi sistema regulacije brzine vrtnje predvidjene su četiri vježbe koje omogućavaju usvajanje teorijskog znanja iz područja analize i sinteze linearnih regulacijskih sistema te eksperimentalnu potvrdu tog znanja. Koncepcija vježbi bazirana je na iskustvima iz prakse.

Sa zadovoljstvom se zahvaljujem dr Petru Crnošiji na pruženoj podršci i sugestijama, a na čiju inicijativu su i nastala ova skripta.

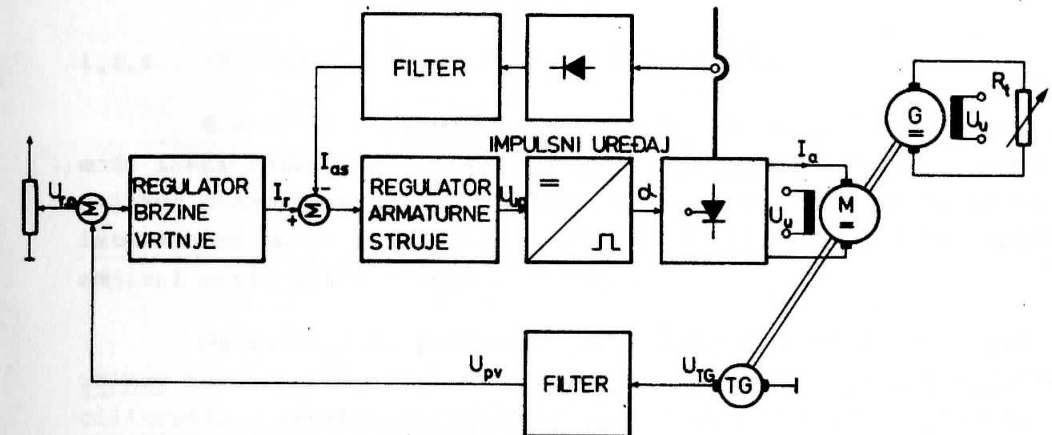
Zagreb, listopad 1978.

Nedjeljko Perić

U V O D

Sistem regulacije brzine vrtnje istosmjernog motora predstavlja jedan klasičan način regulacije industrijskog postrojenja. Regulacija brzine vrtnje motora izvedena je na principu kaskadne regulacije.

Principna shema regulacijskog sistema brzine vrtnje prikazana je na slici 1.



Slika 1. Principna shema sistema regulacije brzine vrtnje

Elementi sistema regulacije brzine vrtnje istosmjernog motora su, kao što je vidljivo sa slike 1:

- istosmjerni motor terećen istosmjernim generatorom,
- tiristorski usmjerivač,
- impulsni uredjaj,
- regulator armaturne struje motora s pripadnim mjernim članom (izmjeničnim strujnim transformatorom),
- regulator brzine vrtnje motora s pripadnim mjernim članom (istosmjernim tahogeneratorom).

Za uspješnije izvodjenje predvidjenih vježbi u poglavlju 1 su razmatrane statičke i dinamičke karakteristike ponaosob svih članova regulacijskog sistema brzine vrtnje, nastojeći pri tome uspostaviti funkcionalnu vezu medju pojedinim članovima.

Rukovanje postojećom maketom dano je u poglavlju 2.

Na maketi sistema regulacije brzine vrtnje predvidjene su četiri vježbe. Svrha tih vježbi je da se preko analize i sinteze regulacijskog sistema upoznaju njegove statičke i dinamičke karakteristike.

U dodatku (poglavlje 3) dana je dopunska materija za savladavanje predvidjenih vježbi.

1. OPIS ELEMENATA SISTEMA REGULACIJE BRZINE VRTNJE

1.1. ISTOSMJERNI MOTOR

Na području reguliranih elektromotornih pogona istosmjerni elektromotori zauzimaju vrlo značajno mjesto, zahvaljujući pogodnim regulacijskim svojstvima. Na današnjem stupnju pogonske tehnike primjenjuju se najčešće regulirani istosmjerni elektromotorni pogoni u valjaonicama, transportnim postrojenjima, alatnim strojevima, u tekstilnoj i papirnoj industriji, industriji sintetičkih materijala itd.

1.1.1. ISTOSMJERNI MOTOR S NEZAVISNOM UZBUDOM

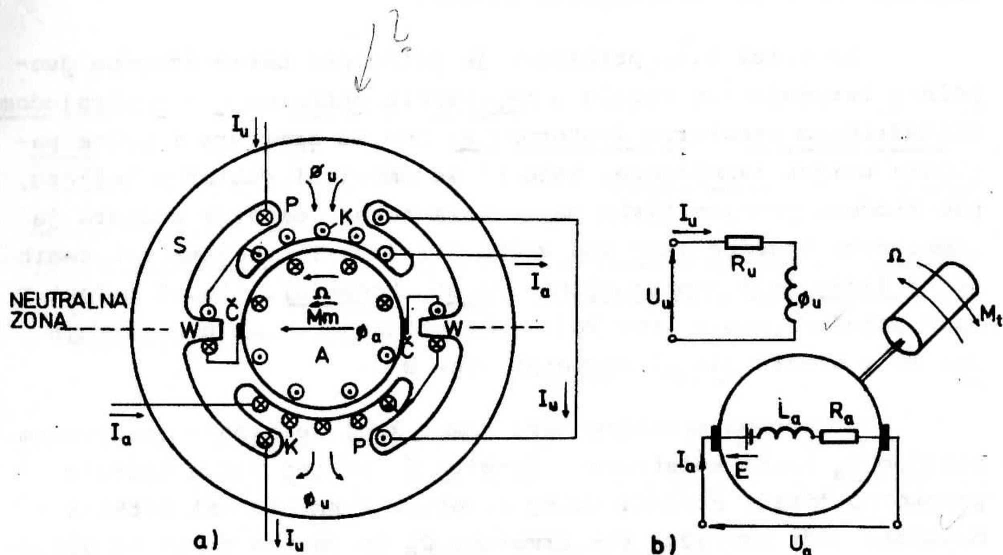
S obzirom na izvedbu uzbudnog kruga, istosmjerni motor može imati različite vanjske karakteristike ($\Omega = f(M_t)$). S regulacijskog stanovišta je najpogodniji i u praksi najčešće susretani istosmjerni motor s nezavisnom uzbudom (u daljnjem tekstu: istosmjerni motor ili istosmjerni stroj).

Na slici 1.1. prikazana je principna shema izvedbe dvopolnog istosmjernog stroja s nepomičnim statorom S i rotirajućom cilindričnom armaturom (rotorom) A. Dok su armatura i polne papučice uvijek lamelirane, kako bi se smanjili gubici u željezu, prouzročeni promjenljivim magnetskim tokom, ostatak statora je lamelirane izvedbe samo kod većih strojeva i strojeva izloženih većim dinamičkim naprezanjima (zalet, kočenje). Glavni polovi P nose uzbudne namote kroz koje teče istosmjerna uzbudna struja I_u, koja stvara glavni magnetski tok $\emptyset_u$.

U utorima armature leži namot koji se napaja armaturnom strujom I_a preko kolektora i četkica Č. Na taj način nastaje prostorno čvrsti strujni oblog armature u smjeru osi četkica. Rezultirajući poprečni tok armature $\emptyset_a$ je znatno manji od uzbudnog toka $\emptyset_u$ zbog velikog zračnog raspora (zazora) u poprečnom smjeru. Pomoću kompenzacijskih namota K koji su smješteni na polnim papučicama, te kroz koje protječe armaturna struja, dade

se još reducirati poprečni tok. Kompenzacijski namoti se općenito stavljaju na strojeve većih snaga; inače se tolerira izobličenje toka uzbudnog polja $\emptyset_u$ (reakcija armature) koje stvara armaturna struja. S kompenzacijskim namotima opremaju se takodjer općenito i strojevi koji dozvoljavaju jaču preopteretivost; u tom slučaju se dozvoljava i brži porast struje i više harmoničke oscilacije struje, a da pri tome bude ispravna komutacija, tj. da ne nastanu iskrenja na četkicama. Takodjer i pomoćni polovi W, kroz čije namote teče armaturna struja, imaju ulogu da utječu na magnetsko polje u neutralnoj zoni (komutacionoj zoni), kako bi se postiglo komutiranje bez iskrenja.

Zakretni moment M_m tvori se na oplošju armature; on je proporcionalan produktu uzbudnog toka i armaturne struje. Napon u krugu armature se sastoji od induciranog napona (protuelektromotorne sile) E, koji je proporcionalan uzbudnom toku i brzini vrtnje, te naponskih doprinosa na namotima armature, kompenzacijskim namotima i namotima pomoćnih polova.



Slika 1.1. Principna a) i nadomjesna b) shema istosmjernog stroja

Nadomjesna shema nezavisno uzbudjenog istosmjernog motora prikazana je na slici 1.1b. Na osnovi te slike dobiven je matematički model motora i u specijalnom slučaju prijenosne funkcije motora.

Matematički model, općenito govoreći, predstavlja idealizirano ponašanje stvarnih stanja. Stupanj idealizacije ovisi o broju i vrsti zanemarenih stanja koja bitno ne utječu na ponašanje istraživane pojave.

Imajući to na umu, istosmjerni motor kao element regulacijskog sistema moguće je predstaviti matematičkim modelom, koji opisuje fizikalne pojave u motoru uz slijedeća zanemarenja:

- histereza krivulje magnetiziranja motora,
- reakcija armature,
- pad napona na četkicama,
- nelinearnost induktiviteta armaturnog kruga (pretpostavlja se da je induktivitet konstantan, tj. da ne ovisi o armaturnoj struji),
- vrtložne i komutacione struje.

Na osnovi ovih zanemarenja mogu se napisati osnovne jednadžbe za motor.

Iz sume napona armaturnog kruga (sl. 1.1.b) dobije se slijedeća jednadžba:

$$U_a = E + R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} , \qquad (1-1)$$

gdje je:

U_a - narinuti napon na motor, /V/,
E - inducirani napon, /V/,
I_a - struja armature, /A/,
L_a - ukupni induktivitet armature, /H/,
R_a - ukupni otpor armature, /Ω/.

Inducirani napon (protuelektromotorna sila) E proporcionalan je produktu uzbudnog toka i kutne brzine vrtnje:

$$E = K_m \emptyset_u \Omega = K_e(I_u) , \qquad (1-2)$$

gdje je:

$\emptyset_u$ - uzbudni (ulančeni) tok po polu, /Vs/,

Ω - kutna brzina vrtnje, /s^{-1}/,

$K_e(I_u)$ - konstanta protuelektromotorne sile, /Vs/.

Konstanta K_m odredjena je konstruktivnim podacima stroja:

$$K_m = \frac{p_m z}{2\Pi a},$$

gdje je:

z - broj vodiča armature,

p_m - broj pari polova,

a - broj pari paralelnih grana armature.

Razvijeni moment motora proporcionalan je umnošku uzbudnog toka i armaturne struje:

$$M_m = K_m \emptyset_u I_a = K_M(I_u) I_a, \qquad (1\text{-}3)$$

gdje je:

$K_M(I_u)$ - konstanta momenta, /Vs/.

Iz sume momenata na osovini motora dobije se jednadžba:

$$M_m = M_t + J \frac{d\Omega}{dt}, \qquad (1\text{-}4)$$

gdje je:

J - moment inercije rotirajućih masa, /kgm^2/,

M_t - moment tereta, /Nm/.

Moment tereta može biti konstantan, ali je u većini slučajeva ovisan o brzini vrtnje:

$$M_t = f_1(\Omega). \qquad (1\text{-}5)$$

U izraz (1-5) uključen je i moment uslijed trenja i ventilacije.

Jednadžba uzbudnog kruga je:

$$U_u = R_u I_u + N_u \frac{d\emptyset_u}{dt}, \qquad (1\text{-}6)$$

gdje je:

N_u - broj zavoja uzbudnog namota,

R_u - otpor uzbudnog kruga /Ω/.

Uzbudna struja I_u ovisi o uzbudnom toku:

Valjda uzbudni tok ovisi o uzbudnoj struji

$$I_u = f_2(\emptyset_u). \qquad (1\text{-}7)$$

Zbog jednostavnosti i preglednosti pisanja i crtanja blok shema uvodi se simbol p za diferencijalni operator $\frac{d}{dt}$. Jednadžbe (1-1) se na taj način može napisati u obliku:

$u_a = E + I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt}$

$$I_a = \frac{K_a}{1+T_a p}(U_a - E), \qquad (1\text{-}8)$$

$I_a(R_a + L_a p) = u_a - E$

$I_a = \frac{1/R_a}{1+\frac{L_a}{R_a}p}(u_a - E)$

gdje je:

$K_a = \frac{1}{R_a}$ - koeficijent pojačanja, /$\frac{A}{V}$/,

$T_a = \frac{L_a}{R_a}$ - armaturna vremenska konstanta, /s/.

Iz jednadžbe (1-4) slijedi:

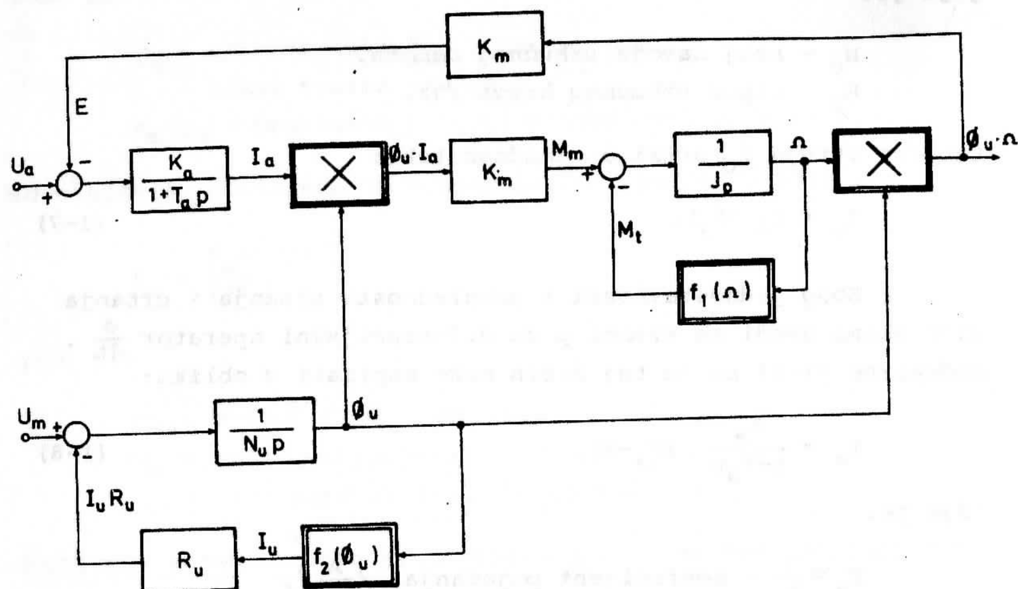
$$\Omega = \frac{1}{Jp}(M_m - M_t). \qquad (1\text{-}9)$$

Jednadžba (1-6) može se pisati na slijedeći način:

$$\emptyset_u = \frac{1}{N_u p}(U_u - R_u I_u). \qquad (1\text{-}10)$$

Na osnovi jednadžbi (1-2), (1-3), (1-5), (1-7), (1-8), (1-9) i (1-10) može se nacrtati blok shema istosmjernog motora (sl. 1.2).

Ako je uzbuda motora konstantna (regulacija brzine vrtnje preko armature) i moment tereta neovisan o brzini, onda se blok shema motora pojednostavljuje. Uvrštavanjem konstantnih vrijednosti za tok i moment ($\emptyset_u = \emptyset_{uo}$ = konst., $M_t = M_{to}$ = konst.) u jednadžbe (1-2) i (1-3) dobije se:



Slika 1.2. Blok shema istosmjernog motora

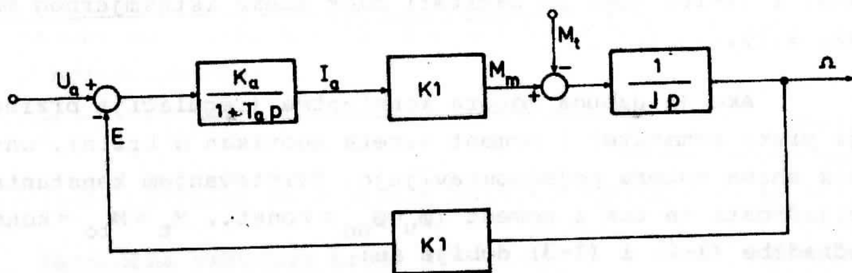
$$E = K_e \Omega = K_1 , \tag{1-11}$$

$$M_m = K_M I_a = K_1 I_a , \tag{1-12}$$

gdje je:

$$K_1 = K_e = K_M .$$

Prema jednadžbama (1-8), (1-9), (1-11) i (1-12) može se nacrtati blok shema istosmjernog motora za ovaj specijalni slučaj (slika 1.3).



Slika 1.3. Blok shema istosmjernog motora s konstantnom uzbudom

Iz jednadžbi i slike 1.3. vidljivo je da se u slučaju regulacije brzine vrtnje preko armature motor ponaša kao linearni element. Prema tome, može se primijeniti princip superpozicije i izračunati brzina vrtnje kad se mijenja samo napon armature, odnosno samo moment tereta. U tom slučaju je pogodnije promatrati promjene veličina oko stacionarnih vrijednosti, a ne njihove apsolutne iznose, pa se uvode oznake:

$$U_a = U_{ao} + \Delta U_a ,$$
$$I_a = I_{ao} + \Delta I_a ,$$
$$M_m = M_m + \Delta M_a ,$$
$$M_t = M_{to} + \Delta M_t ,$$
$$\Omega = \Omega_o + \Delta\Omega ,$$
$$E = E_o + \Delta E ,$$

gdje oznake s indeksom nula znače stacionarne vrijednosti, a oznake sa znakom Δ znače promjene oko tih stacionarnih vrijednosti. Za promjene veličina dobije se ista blok shema kao i na slici 1.3.

Promjena brzine vrtnje kad se mijenja samo napon armature ($\Delta M_t = 0$) iznosi:

$$\Delta\Omega(p) = \frac{1/K_1}{1+T_m p+T_a T_m p^2} \Delta U_a(p) , \tag{1-13}$$

gdje je:

$$T_m = \frac{J}{K_a K_1^2} = \frac{J R_a}{K_m^2 Ø_{uo}^2}$$ – elektromehanička vremenska konstanta, /s/.

Promjena brzine vrtnje kad se mijenja samo moment tereta ($\Delta U_a = 0$) iznosi (slika 1.3.):

$$\Delta\Omega(p) = -\frac{1}{K_a K_1^2} \frac{1+T_a p}{1+T_m p+T_a T_m p^2} \Delta M_t(p) . \tag{1-14}$$

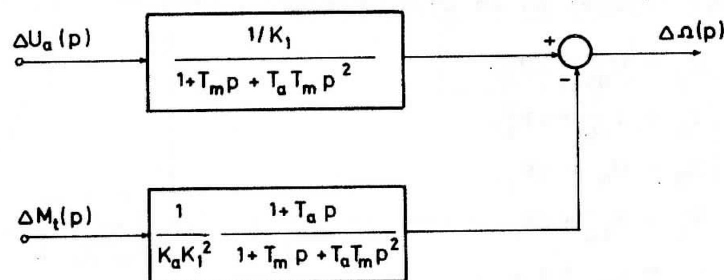
Prema tome ukupna promjena brzine vrtnje, kada nastaje i promjena napona armature i promjena momenta tereta, iznosi:

Prijen. fun. motora $G_m(p)=\frac{\Delta\Omega(p)}{\Delta U_a(p)} = PT_2$ član

$$\Delta\Omega(p) = \frac{1/K_1}{1+T_m p+T_a T_m p^2}\,\Delta U_a(p) - \frac{1}{K_a K_1^2}\,\frac{(1+T_a p)}{1+T_a p+T_a T_m p^2}\,\Delta M_t(p)\,. \qquad (1\text{-}15)$$

PΔT₂ član

Na slici 1.4. nacrtana je blok shema motora prema jednadžbi (1-15).



Slika 1.4. Prijenosne funkcije istosmjernog motora s konstantnom uzbudom

Ukupna promjena armaturne struje s obzirom na promjenu napona armature i promjenu momenta tereta iznosi (slika 1.3.):

$$\Delta I_a(p) = \frac{K_a T_m p}{1+T_m p+T_a T_m p^2}\,\Delta U_a(p) + \frac{1/K_1}{1+T_m p+T_a T_m p^2}\,\Delta M_t(p). \qquad (1\text{-}16)$$

$G_I(p)=\frac{\Delta I_a(p)}{\Delta U_a(p)} = DT_2$ član PT₂ član

Armaturna struja i brzina vrtnje su linearne kombinacije armaturnog napona i momenta tereta. Vlastite vrijednosti sistema (nul-točke karakteristične jednadžbe) su:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T_a}\left[1 \pm \sqrt{1 - 4\,\frac{T_a}{T_m}}\,\right], \qquad (1\text{-}17)$$

a vlastita (prirodna neprigušena) frekvencija je:

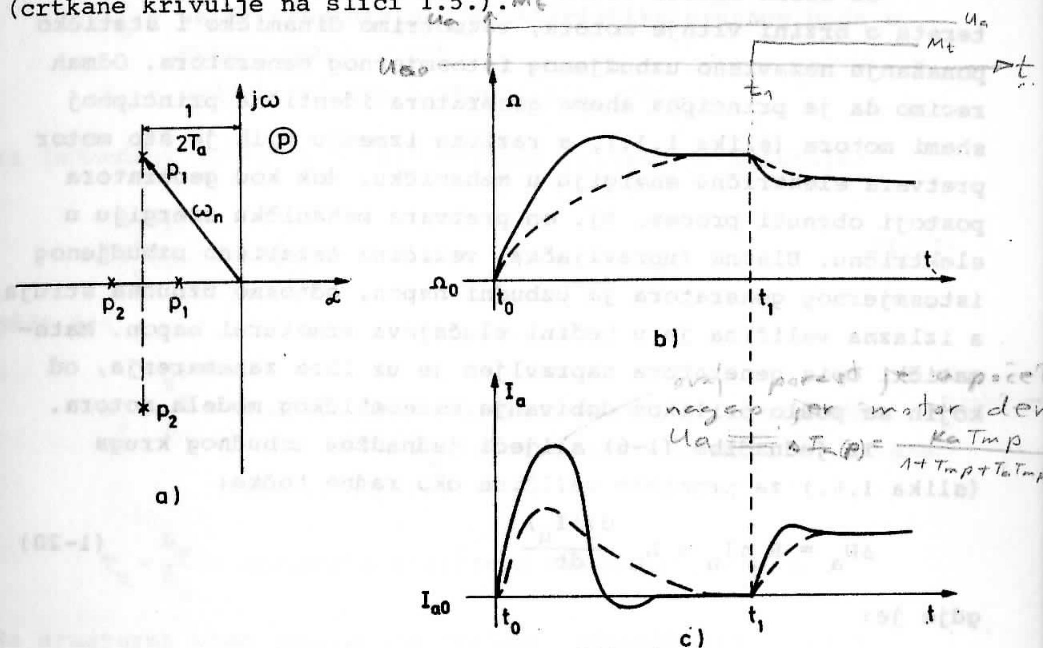
$$\omega_n = p_1 p_2 = \frac{1}{\sqrt{T_a T_m}}\,. \qquad (1\text{-}18)$$

Relativni faktor prigušenja je:

$$\zeta = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_m}{T_a}}\,. \qquad (1\text{-}19)$$

brzine okretaja na drugu brzinu okretaja izraženij. će se okretaji povećavati postepeno (zbog inercije motora

Iz jednadžbe (1-17) je vidljivo da će rješenja karakteristične jednadžbe biti realna kad je $T_m \geq 4T_a$, što znači da će prijelazne karakteristike brzine vrtnje i struje imati aperiodski karakter (crtkane krivulje na slici 1.5.).



Slika 1.5. Položaj korjena karakteristične jednadžbe a) i prijelazne karakteristike (odzivi) brzine vrtnje b) i armaturne struje c);

——— $T_m \leq 4T_a$, ------- $T_m \geq 4T_a$.

aperiodski

U trenutku t_1 (slika 1.5. b, c) na motor je narinut moment tereta što se manifestira opadanjem brzine i porastom struje po vremenskim karakteristikama definiranim odnosom T_m/T_a. U specijalnom slučaju moment tereta je proporcionalan brzini vrtnje. To se javlja npr. ako motor indirektno teretimo istosmjernim generatorom čija je osovina mehanički čvrsto vezana s osovinom motora.

Kad idemo sa Ω₀ na neki ΔΩ = ΔΩ₀ + ΔΩ onda u tu promjena Ua sa Ua0 na Ua1 = Ua0 + ΔUa, pri tome se u početnom trenutku brzina i armaturna struja u početku naglo povećava (motor povuče kod ubrzanja veliku struju koju troši na savladavanje momenta inercije rotirajuće mase) ali se kod postignutih okretaja

1.1.2. ISTOSMJERNI MOTOR TEREĆEN GENERATOROM

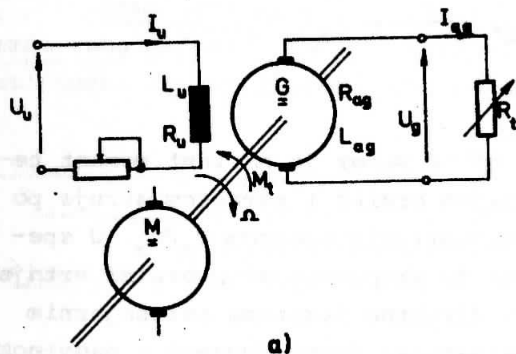
Da bismo dobili točan analitički izraz ovisnosti momenta tereta o brzini vrtnje motora, razmotrimo dinamičko i statičko ponašanje nezavisno uzbudjenog istosmjernog generatora. Odmah recimo da je principna shema generatora identična principnoj shemi motora (slika 1.1.), a razlika izmedju njih je što motor pretvara električnu energiju u mehaničku, dok kod generatora postoji obrnuti proces, tj. on pretvara mehaničku energiju u električnu. Ulazna (upravljačka) veličina nezavisno uzbudjenog istosmjernog generatora je uzbudni napon, odnosno uzbudna struja, a izlazna veličina je u većini slučajeva armaturni napon. Matematički opis generatora napravljen je uz ista zanemarenja, od kojih se pošlo prilikom dobivanja matematičkog modela motora.

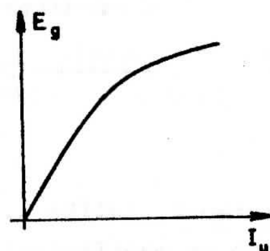
Iz jednadžbe (1-6) slijedi jednadžba uzbudnog kruga (slika 1.6.) za promjene veličine oko radne točke:

$$\Delta U_a = R_u \Delta I_u + L_u \frac{d(\Delta I_u)}{dt} \tag{1-20}$$

gdje je:

$$L_u = N_u \left(\frac{d\emptyset_u}{dI_u} \right)_{I_u = I_{uo}}$$ - dinamički induktivitet /H/.





Slika 1.6. Istosmjerni nezavisno uzbudjeni generator a) i njegova karakteristika praznog hoda b).

U linearnom dijelu karakteristike praznog hoda generatora (slika 1.6. b), odnosno za dovoljno male promjene napona generatora oko radne točke iz jednadžbe (1-2) dobije se, uz konstantnu brzinu vrtnje $(\Omega = \Omega_o)$:

$$\Delta E_g = K'_g \Delta I_u , \tag{1-21}$$

gdje je:

K'_g - nagib tangente na karakteristiku praznog hoda u radnoj točci, [V/A] ,

E_g - inducirani napon generatora, /V/.

Iz jednadžbi (1-20) i (1-21) slijedi prijenosna funkcija:

$$\frac{\Delta E_g(p)}{\Delta U_u(p)} = \frac{K_u}{1+T_u p} , \tag{1-22}$$

gdje je:

$K_u = \frac{K'_g}{R_u}$ - koeficijent naponskog pojačanja generatora, [V/V] , (u R_u je uračunat i eventualno izvana dodani otpor),

$T_u = \frac{L_u}{R_u}$ - vremenska konstanta uzbudnog kruga, /s/.

Za armaturni krug generatora vrijedi jednadžba (sl. 1.6.):

$$E_g = (R_{ag}+R_t)\, I_{ag} + L_{ag} \frac{dI_{ag}}{dt} \tag{1-23}$$

Iz relacije (1-2) dobije se, uz konstantnu uzbudu ($I_u = I_{uo}$, $\emptyset_u = \emptyset_{uo}$), izraz za inducirani napon generatora:

$$E_g = K_m \emptyset_{uo} \Omega = K_{1g} \Omega . \tag{1-24}$$

Za moment generatora (moment tereta za motor) dobije se iz (1-3) izraz:

$$M_g = M_t = K_m \emptyset_{uo} I_{ag} = K_{1g} I_{ag} . \tag{1-25}$$

Iz jednadžbi (1-23) i (1-24) slijedi:

$$I_{ag}(p) = \frac{K_{1g}}{R_{ag}+R_t} \frac{\Omega(p)}{1+T_{ag}p} , \tag{1-26}$$

gdje je:

$T_{ag} = \dfrac{L_{ag}}{R_{ag}+R_t}$ - vremenska konstanta armaturnog kruga generatora, /s/.

Uvrštavanjem jednadžbe (1-26) u jednadžbu (1-25) dobiva se:

$$M_t(p) = \frac{K_{1g}^2}{R_{ag}+R_t} \cdot \frac{\Omega(p)}{1+T_{ag}(p)} . \qquad (1-27)$$

Pošto je za konkretni pogon na kojem ćemo eksperimentirati $R_t \gg R_{ag}$ i $T_{ag} \ll T_a$, jednadžba (1-27) poprima oblik:

$$M_t = K_T \Omega, \qquad (1-28)$$

gdje je:

$$K_T = K_T(I_{uo}) = \frac{K^2_{1g}(I_{uo})}{R_t} , \quad /\mathrm{Nms}/.$$

Koeficijent proporcionalnosti izmedju brzine vrtnje i momenta tereta može se računati prema formuli (1-29):

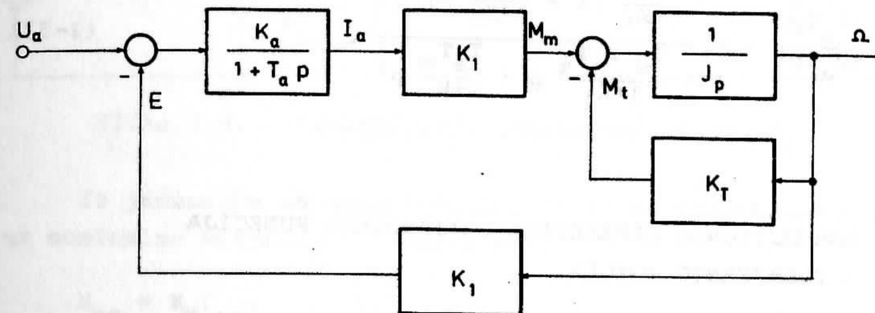
$$K_T(I_{uo}) = \frac{\frac{E_g}{\Omega}\,\frac{M_t}{I_{ag}}}{R_t} = \frac{\frac{E_g}{\Omega^2}\,\frac{P_g}{I_{ag}}}{R_t} \doteq \frac{P_g}{\Omega^2} , \qquad (1-29)$$

gdje je:

$P_g \doteq E_g I_{ag}$ - snaga koja se troši u krugu armature generatora, /W/.

Koristeći jednadžbu (1-28), može se blok shema prikazana na slici 1.3. proširiti jednim dodatnim članom kao što je vidljivo sa slike 1.7. Koeficijent K_T u ovom sistemu treba promatrati kao "izvana upravljivi parametar". Njegov iznos se može mijenjati promjenom uzbudne struje generatora ili promjenom opteretnog otpora u krugu armature generatora.

Integralni član na slici 1.7. ima u povratnoj vezi koeficijent K_T, što znači da će taj unutrašnji krug poprimiti svojstvo proporcionalnog člana s usporenjem prvog reda.



Slika 1.7. Blok shema istosmjernog motora terećenog generatorom

Promjena brzine vrtnje prouzročena promjenom armaturnog napona za blok shemu na slici 1.7. izražava se prijenosnom funkcijom:

$$\frac{\Delta\Omega(p)}{\Delta U_a(p)} = \frac{\dfrac{1}{K_1(1+K_2)}}{1+\dfrac{T_m+K_2T_a}{1+K_2}\,p+\dfrac{T_aT_m}{1+K_2}\,p^2} \qquad (1-30)$$

gdje je:

$$K_T = \frac{k_r}{K_a K_1{}^2}$$

Iz jednadžbe (1-30) slijedi faktor relativnog prigušenja sistema:

$$\zeta_1 = \frac{1+\dfrac{K_2}{4\zeta^2}}{\sqrt{1+K_2}} \cdot \zeta \qquad (1-31)$$

U jednadžbi (1-31) je $\zeta = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_m}{T_a}}$ kao što je i izraženo jednadžbom (1-29).

Nadalje je (slika 1.7.):

$$\frac{\Delta I_a(p)}{\Delta U_a(p)} = \frac{\frac{K_a K_2}{1+K_2}\left(1 + \frac{T_m}{1+K_2}p\right)}{1 + \frac{T_m + K_2 T_a}{1+K_2}p + \frac{T_a T_m}{1+K_2}p^2} . \qquad (1-32)$$

1.1.3. ODREDJIVANJE PARAMETARA PRIJENOSNIH FUNKCIJA ISTOSMJERNOG MOTORA

Konstanta protuelektromotorne sile K_e i konstanta momenta K_M koje su se u dosadašnjem razmatranju uzimale medjusobno jednakim ($K_1 = K_e = K_M$), mogu se za realne podatke stroja u izvjesnoj mjeri medjusobno razlikovati. Zbog toga ćemo dati postupak odredjivanja i jedne i druge konstante.

Za odredjivanje konstante protuelektromotorne sile K_e koristi se jednadžba armaturnog kruga (1-1) za stacionarno stanje uz nominalne vrijednosti:

$$U_{an} = R_a I_{an} + E_n = R_a I_{an} + K_e \Omega_n . \qquad (1-33)$$

Iz (1-33) slijedi:

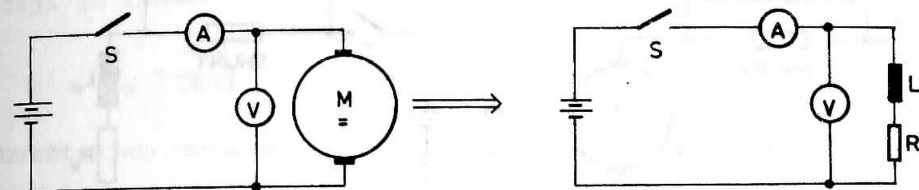
$$K_e = \frac{U_{an} - I_{an}R_a}{\Omega_n} = \frac{U_{an} - I_{an}R_a}{\frac{\Pi n_n}{30}} = 9,55\ \frac{U_{an} - I_{an}R_a}{n_n}, \qquad (1-34)$$

gdje je:

n_n - nominalna brzina vrtnje [0/min] .

Za izračunavanje konstante K_e potreban je osim nominalnih podataka stroja i otpor armature motora R_a. Vrijednost otpora R_a mjeri se U-I metodom kao što je pokazano na slici 1.8., koristeći se pri tome napajanjem iz akumulatorske baterije (npr. U = = 24 V). Prilikom ovog mjerenja poželjno je odspojiti uzbudu i motor zakočiti.

Iz očitanih vrijednosti napona i struje izračuna se ukupni otpor armaturnog kruga sa zadovoljavajućom točnošću.



Slika 1.8. Odredjivanje armaturnog otpora R_a

Iz jednadžbe za moment motora (1-3) za stacionarno stanje i uz nominalne vrijednosti dobiva se:

$$M_{mn} = K_M I_{an},$$

pa konstanta momenta iznosi:

$$K_M = \frac{M_{mn}}{I_{an}} \qquad (1-35)$$

Koristeći relaciju:

$$M_{mn} = \frac{P_n}{\Omega_n} = \frac{30P_n}{\Pi n_n} = 9,55\ \frac{P_n}{n_n}\ [\mathrm{Nm}] = 0,976\ \frac{P_n}{n_n},\ /\mathrm{kpm}/ \qquad (1-36)$$

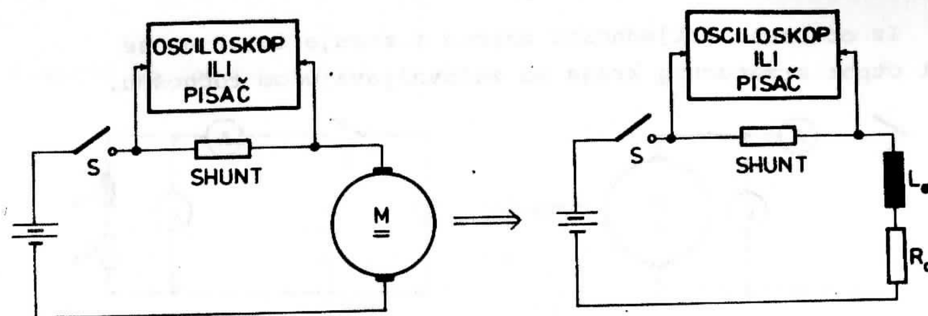
jednadžba (1-35) se može pisati u obliku:

$$K_M = 9,55\ \frac{P_n}{I_{an}n_n}\ [\mathrm{Nm/A}] = 0,975\ \frac{P_n}{I_{an}n_n},\ [\mathrm{kpm/A}] . \qquad (1-37)$$

Vremensku konstantu armaturnog kruga $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ moguće je odrediti (slika 1.9.) iz odziva struje armaturnog kruga kad je motor zakočen (i odspojena uzbuda).

Elektromehaničku vremensku konstantu računamo pomoću formule:

$$T_m = \frac{JR_a}{K_e K_M} . \qquad (1-38)$$



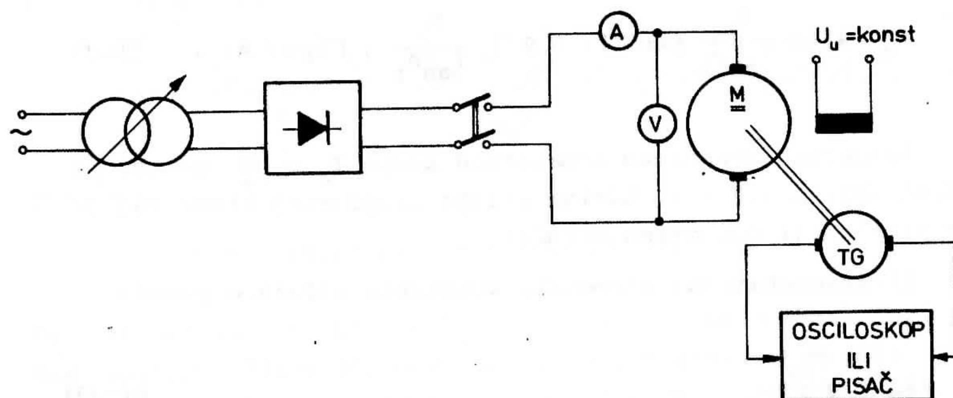
Slika 1.9. Odredjivanje armaturne vremenske konstante

Budući se moment inercije J rijetko daje kao parametar stroja, a uz to još ovisi i o radnom mehanizmu vezanom na njegovu osovinu, potrebno ga je eksperimentalno odrediti. Relativno jednostavno se dade dobiti iz "pokusa zaustavljanja" prema slici 1.10. Pokus se izvodi na taj način da se motor, koji se vrti brzinom nešto većom od nazivne (oko 20%), odspoji od napajanja i na pisaču snimi dijagram brzine vrtnje prilikom zaustavljanja. Moment kočenja je pri tome dan relacijom:

$$M_k = - J \frac{d\Omega}{dt} = - \frac{mD^2}{38,3} \frac{dn}{dt} , \quad /Nm/, \tag{1-39}$$

gdje je:

$$J = \frac{mD^2}{4} \; [kg \; m^2] = \frac{G D^2}{4g}, \quad /kpms^2/. \tag{1-39a}$$



Slika 1.10. Odredjivanje elektromehaničke vremenske konstante

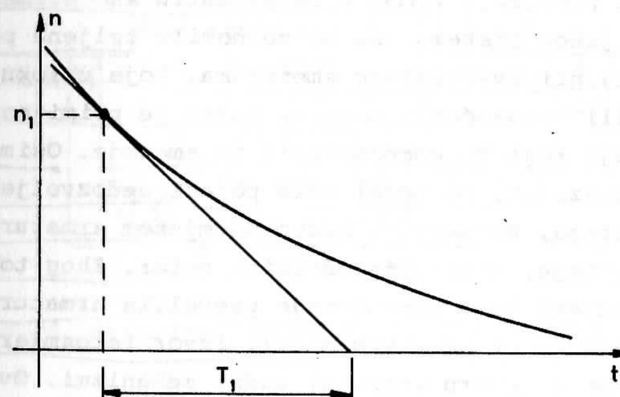
Prilikom zaustavljanja troši se energija (koja zaustavlja stroj), čiji je iznos:

$$P_k = \frac{M_k \Omega}{1000} , \quad /kW/. \tag{1-40}$$

Uvrštenjem formule (1-39) u formulu (1-40) dobiva se:

$$P_k = - \frac{mD^2}{365000} n \cdot \frac{dn}{dt} , \quad /kW/. \tag{1-41}$$

Derivaciju $\frac{dn}{dt}$ odredjujemo tako da povučemo tangentu u točki (n_1, t), (slika 1.11.) i očitamo vrijednost subtangente T_1, tj. odredimo tzv. "fiktivno vrijeme zaustavljanja". Vrijeme T_1 je ono vrijeme nakon kojeg bi se stroj zaustavio ako bi moment kočenja M_K ostao nadalje nepromijenjen. Medjutim, moment kočenja se smanjuje sa smanjenjem brzine vrtnje, te se stoga zaustavljanje ne vrši po linearnoj trajektoriji.



Slika 1.11. Odredjivanje vremenske promjene brzine

Vremenska promjena brzine vrtnje dade se izraziti kao:

$$\frac{dn}{dt} = - \frac{n_1}{T_1} . \tag{1-42}$$

Uvrštavanjem jednadžbe (1-42) u (1-41) dobiva se:

$$mD^2 = \frac{365000 \; P_k T_1}{{n_1}^2} , \quad /kgm^2/. \tag{1-43}$$

Voltmetar i ampermetar na slici 1.10. služe za mjerenje napona i struje, odnosno odredjivanje snage gubitaka P_k kod brzine n_1.

Uvrštenjem izraza (1-43) u (1-39a) dobiva se moment inercije rotirajućih masa na osnovu kojeg izračunamo elektromehaničku vremensku konstantu.

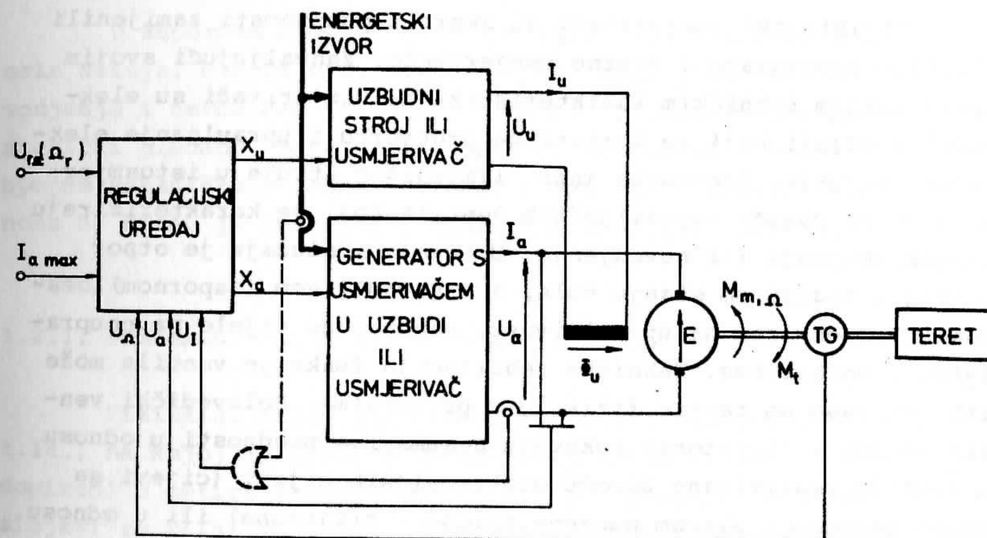
Pored izloženog postupka za odredjivanje vremenskih konstanti T_a i T_m postoje i druge metode za njihovo odredjivanje. Medjutim, način odredjivanja T_a i T_m, koji je izložen, najuobičajeniji je u praksi.

1.1.4. REGULACIJA BRZINE VRTNJE I MOMENTA ISTOSMJERNOG MOTORA

U poglavlju 1.1.1 objašnjena su dinamička ponašanja nezavisno uzbudjenog istosmjernog motora s konstantnom uzbudom. Razmatranja se sada proširuju i motor se promatra kao element zatvorenog regulacijskog sistema. Da bi se dobila željena pogonska ponašanja motora pri eventualnim smetnjama, koje uzrokuje ili napojna mreža ili opterećenje motora, nužno je primijeniti regulacijske uredjaje koji bi kompenzirali te smetnje. Osim toga, u prelaznom procesu (zalet, kočenje) može poteći nedozvoljeno velika armaturna struja, uzrokovana brzom promjenom armaturnog napona ili brzine vrtnje, koja može oštetiti motor. Zbog toga je neophodno predvidjeti brzo ograničenje prevelike armaturne struje (momenta) kako bi se zaštitio motor, izvor istosmjernog napajanja motora, kao i motoru pripadni radni mehanizmi. Ova zaštita se najelegantnije izvodi pomoću regulacijskog uredjaja. Principna shema regulacije brzine vrtnje, uključivo i zaštite od prevelike armaturne struje, prikazana je na slici 1.12., gdje se armatura i uzbuda motora napajaju iz dvaju upravljivih naponskih izvora.

Kao upravljivi naponski izvori danas prevladavaju tiristorski usmjerivači, dok su se ranije koristili rotacioni pretvarači i živini usmjerivači.

Nominalna snaga uzbudnog kruga iznosi oko 5-10% snage armaturnog kruga. Slika 1.12. sadrži blok nazvan "regulacijski uredjaj" kome se preko napona $U_{r\Omega}$ zadaje željena veličina brzine vrtnje Ω_r, te maksimalna dozvoljena struja armature I_{amax}. Stvarna brzina vrtnje motora mjeri se pomoću tahogeneratora montiranog na osovinu motora. Inducirani napon tahogeneratora proporcionalan je brzini vrtnje motora. Armaturna struja mjeri se pomoću istosmjernog ili izmjeničnog strujnog transformatora. Principna shema regulacije brzine vrtnje prikazana na slici 1.12. omogućava regulaciju brzine vrtnje upravljanjem armaturnim naponom i (ili) upravljanjem uzbudnim tokom. Obično se



Slika 1.12. Principna shema kombinirane regulacije brzine vrtnje

promjena brzine vrtnje do nominalnog iznosa provodi promjenom armaturnog napona uz konstantnu (nominalnu) uzbudu. Kad se dosegne nominalna brzina vrtnje (što obično odgovara i nominalnom armaturnom naponu), napon armature se održava fiksnim, a promjena brzine vrtnje iznad nominalne vrši se promjenom uzbudne struje, odnosno uzbudnog toka. Opisani način regulacije brzine vrtnje preko armature i uzbude naziva se kombinirana regulacija. Na osnovi namještenih (referentnih) vrijednosti i stvarnih vrijednosti reguliranih veličina, regulacijski uredjaj tvori izvršne veličine X_a i X_u za upravljanje naponskim izvorima. Regula-

cijski uredjaj se pojednostavljuje ako se regulacija brzine vrtnje vrši samo promjenom napona armature ili samo promjenom uzbudnog toka.

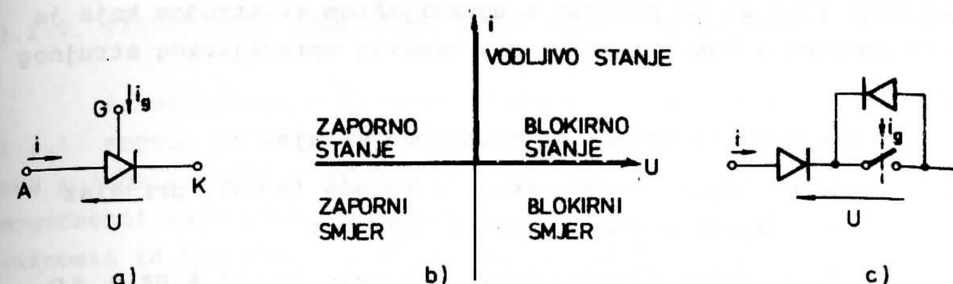
U praksi treba često regulirati osim brzine vrtnje i pogonskog momenta još i ubrzanje, te poziciju (kut zakreta), što iziskuje dodatne mjerne članove, a regulacijski uredjaj postaje složeniji.

1.2. TIRISTORSKI USMJERIVAČ

Tiristorski usmjerivači su skoro u potpunosti zamijenili rotacione pretvarače i živine usmjerivače, zahvaljujući svojim superiornijim tehničkim karakteristikama. Usmjerivači su električni uredjaji koji se koriste za pretvorbu i upravljanje električne energije. Pretvorba (npr. izmjenične struje u istosmjernu) vrši se pomoću ispravljačkih ventila koji se karakteriziraju stanjem vodjenja ili nevodjenja. U idealnom slučaju je otpor ventila u vodljivom stanju nula, a u nevodljivom (zapornom) beskonačan. S obzirom na upravljivost, ventili se dijele na neupravljive i upravljive. Tehnička realizacija funkcije ventila može biti bazirana na raznim fizikalnim principima. Poluvodički ventili (diode i tiristori) pokazuju nesumnjive prednosti u odnosu na ventile realizirane pomoću elektroničkih cijevi (cijevi sa žarnom katodom i plinom punjene triode - tiratrone) ili u odnosu na živine ventile. Ranije korišteni ventili su imali odredjene nedostatke s obzirom na snagu, stupanj djelovanja, životnu dob, dimenzije i neprikladnost pogonskim uvjetima. U daljnjem tekstu će se pod pojmom neupravljivi ventil podrazumijevati poluvodička dioda, a pod pojmom upravljivi ventil tiristor.

Na slici 1.13. prikazan je simbol tiristora, idealna karakteristika tiristora, te njegov statički nadomjesni spoj.

Odgovarajući simboli na slici 1.13. znače: A - anoda, K - katoda, G - upravljačka elektroda (gate), i - struja tiristora, U - napon tiristora, ig - upravljačka struja tiristora.

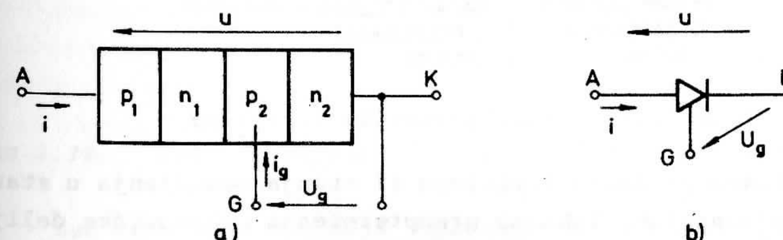


Slika 1.13. a) simbol tiristora; b) idealna karakteristika tiristora; c) nadomjesni statički spoj

U zapornom smjeru ($u < o$) protiče kroz tiristor zanemarivo mala struja, dok za drugi smjer ($u > o$) mogu postojati dva stanja: vodjenje i nevodjenje (blokirno stanje). Tiristor se prema tome, statički gledano, može aproksimativno predstaviti serijskim spojem mehaničke sklopke i diode. Bitna razlika tiristora u odnosu na diodu je postojanje blokirnog stanja tiristora.

1.2.1. FIZIKALNI NAČIN DJELOVANJA TIRISTORA

Fizikalni način djelovanja tiristora vidljiv je iz slike 1.14., na kojoj je tiristor predstavljen kao kristal (različito dopiran) u četiri sloja, odnosno tri p-n prijelaza. Srednji slojevi su relativno slabo dopirani za razliku od vanjskih.

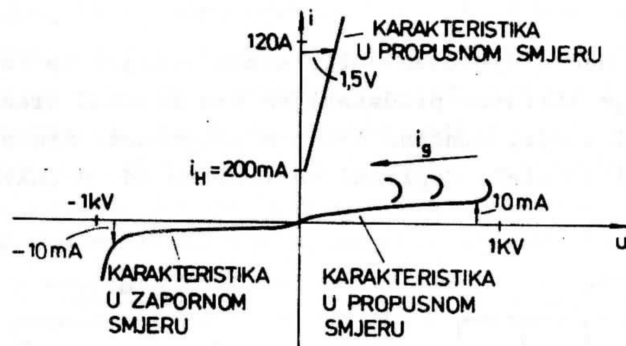


Slika 1.14. Poluvodička struktura tiristora a) i njegov simbol b).

Unutrašnji sloj P_1 je povezan s upravljačkom elektrodom koja je izvana spojena s katodom preko niskoomskog upravljačkog strujnog kruga.

U radnim okolnostima moguća su slijedeća stanja:

1. Uz negativni napon izmedju anode i katode ($u < o$), prijelaz p_1-n_1 je u zapornom stanju (slika 1.13.b);
2. Uz pozitivni napon izmedju anode i katode ($u > o$) i uz $u_g < o$ (ne teče upravljačka struja i_g), prijelaz n_1-n_1 je u blokirnom stanju (slika 1.13.b);
3. Uz pozitivni napon izmedju anode i katode ($u > o$), te uz dovoljno veliku upravljačku struju i_g, prijelaz n_1-p_2 je u stanju vodjenja; zona n_1 je sada preplavljena nosiocima naboja s obaju strana i tiristor ima neznatni (propusni) otpor. Stanje vodjenja ostaje i uz i_g=O tako dugo dok struja (i) ne padne ispod odredjene vrijednosti struje držanja i_H. Tek kada struja (i) padne ispod i_H, tiristor prelazi u zaporno ili blokirno stanje, ovisno o naponu (u). Na slici 1.15. dan je izgled karakteristika tiristora s brojčanim vrijednostima tipičnim za tiristore srednjih snaga.



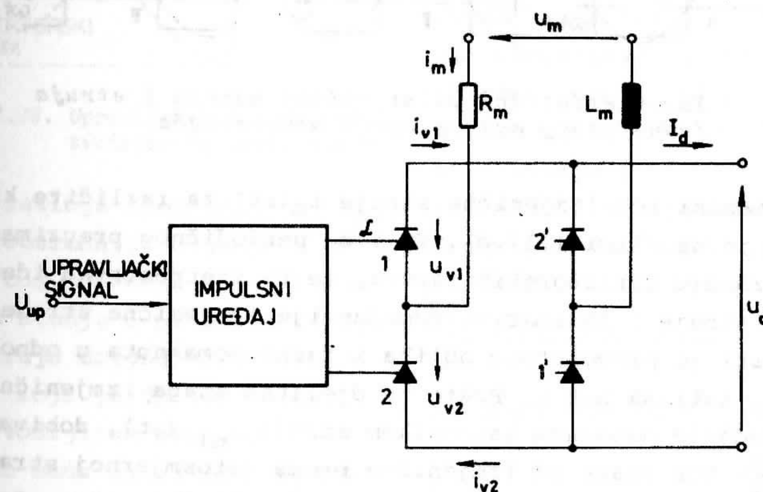
Slika 1.15. Karakteristike tiristora

Prilikom prelaska tiristora iz stanja nevodjenja u stanje vodjenja mogu nastati lokalna preopterećenja poluvodičke ćelije koja treba po mogućnosti izbjeći. To se najbolje postiže time da se propaljivanje tiristora vrši kratkotrajnim impulsom upravljačke struje i_g koji ima strme bridove. Time se prijelaz iz nevodljivog stanja u vodljivo odvija uz smanjena lokalna preopterećenja.

1.2.2. TIRISTORSKI JEDNOFAZNI MOSNI SPOJ USMJERIVAČA

Zahvaljujući svojstvima tiristora opisanim u poglavlju 1.2.1. moguće je realizirati elektronički upravljiva tiristorska pojačala snage s malim gubicima i sa širokim opsegom snage. Mogućnosti koje pružaju ovakva pojačala snage od nesumnjive su važnosti za regulirane elektromotorne pogone.

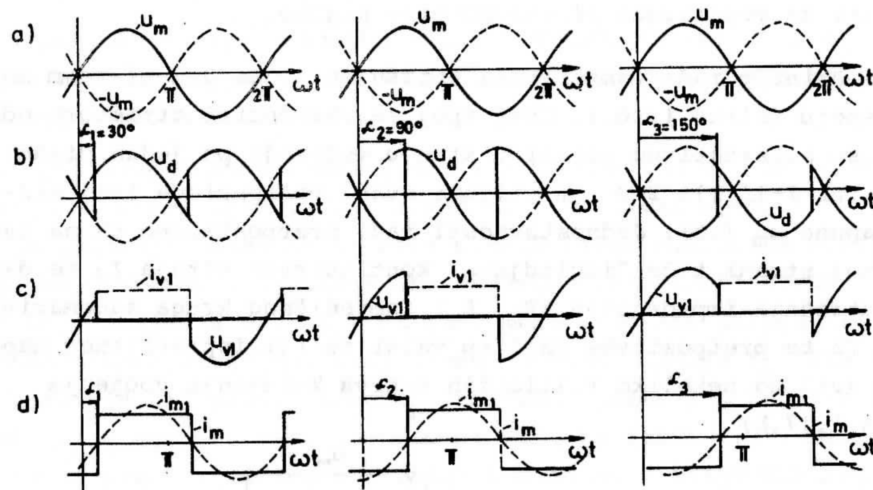
Princip rada usmjerivača objašnjen je na jednofaznom mosnom spoju (slika 1.16.). Ovaj spoj sadrži četiri tiristora od kojih se alternativno nalazi u stanju vodjenja po jedan dijagonalni par 1-1′ ili 2-2′ za vrijeme svake poluperiode izmjeničnog napona u_m (ωt). Jednostavnosti radi pretpostavimo da na istosmjernoj strani teče "izgladjena" kontinuirana struja I_d te da je unutrašnja impedancija (R_m, L_m) izmjeničnog kruga zanemarivo mala. Uz te pretpostavke dani su valni oblici ispravljenog napona u_d (ωt) za nekoliko različitih kuteva kašnjenja vodjenja (slika 1.17.b).



Slika 1.16. Jednofazni tiristorski mosni spoj usmjerivača

Kut kašnjenja vodjenja (upravljanja) predstavlja kašnjenje trenutka početka vodjenja (odnosno pojave strujnog impulsa i_g) tiristora u odnosu na "prirodni kut vodjenja" karakterističan za diodni most. Za tiristore 1-1′ "prirodni kut vodjenja" iznosi: $\omega t=0, 2\Pi$, ... Kut kašnjenja vodjenja ovisi o iznosu upravljačkog signala U_{up} (slika 1.16.).

Na slici 1.17.c jasno je naznačeno djelovanje tiristora; struja i_{V1} i napon na tiristoru u_{V1} nisu nikada istovremeno jednaki nuli. U stacionarnom stanju su pripadni naponi i struje tiristorskog para 2-2' pomaknuti za jednu poluperiodu u odnosu na iste veličine para 1-1'.



Slika 1.17. Karakteristični valni oblici napona i struja jednofaznog mosnog spoja usmjerivača

Vremenski tok izmjenične struje $i_m(\omega t)$ za različite kuteve α dan je na slici 1.17.d). Uslijed periodičnog preuzimanja vodjenja izmedju tiristorskih parova, te uz pretpostavku idealno "gladjene" struje i zanemarive impedancije izmjenične strane, struja $i_m(\omega t)$ je pravokutnog oblika i fazno pomaknuta u odnosu na napon u_m (ωt) za kut α. Pošto se djelatna snaga izmjenične strane odredjuje osnovnom harmonikom struje i_{m1} (ωt), dobiva se za $0 < \alpha < \frac{\Pi}{2}$ tok snage od izmjenične prema istosmjernoj strani. Ovaj režim rada usmjerivača naziva se ispravljački režim. Za $\frac{\Pi}{2} < \alpha < \Pi$ tok snage je obratan i usmjerivač se tada nalazi u invertorskom režimu.

Za istosmjerne pogone interesantna je prije svega srednja vrijednost istosmjernog napona ovisnog o kutu α:

$$U_d = \frac{1}{\Pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\Pi} u_m(\omega t)d(\omega t) = \frac{1}{\Pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\Pi} U_m \sin\omega t\, d(\omega t) = U_{do}\cos\alpha, \qquad (1-44)$$

gdje je:

$$U_{do} = U_m \frac{m}{\Pi} \sin\frac{\Pi}{m} = \frac{2}{\Pi} U_m,$$

s tim da je m jednak broju pulzacija ispravljenog napona u toku jednog perioda izmjeničnog napona (za razmatrani slučaj je m=2). Jednadžba (1-44) je grafički prikazana na slici 1.18., te se dobila upravljačka karakteristika tiristorskog usmjerivača.

Pošto istosmjerna struja I_d može imati samo jedan smjer, s promjenom predznaka napona U_d mijenja se i predznak snage $U_d I_d$ istosmjernog kruga.

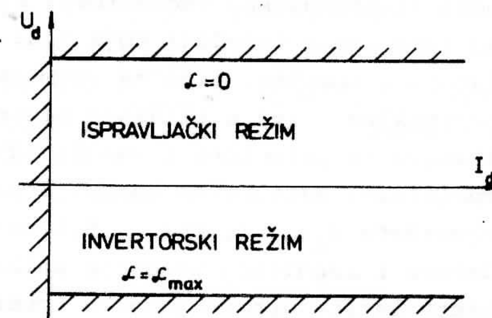


Slika 1.18. Upravljačka karakteristika tiristorskog usmjerivača

Prema tome, spoj na slici 1.16. predstavlja, uz navedene pretpostavke, upravljivi naponski izvor za rad u dva kvadranta (slika 1.19.).

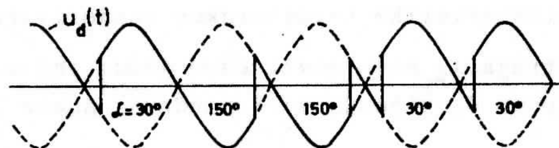
Pošto se vremensko pomicanje kuta kašnjenja vodjenja izvodi elektronički, tiristorski usmjerivač je vrlo brzi izvršni (postavni) član. Teoretska maksimalna vrijednost kuta kašnjenja vodjenja iznosi Π. Iz razloga komutacije je $\alpha_{max} = 150°-160°$. Komutacija je proces preuzimanja vodjenja struje jednog tiristorskog kruga, koji je do tog trenutka bio u nevodljivom stanju i prestanak vodjenja struje drugog tiristorskog kruga, koji je do tog trenutka bio u vodljivom stanju.

Do sada razmatrana ponašanja tiristorskog usmjerivača odnosila su se na stacionarna stanja i to uz idealizirane okolnosti. Dinamičko ponašanje tiristorskog usmjerivača nije moguće obuhvatiti jednostavnim razmatranjima. Ilustracije radi, osvrnimo se ukratko na sliku 1.20., koja predstavoja prijelazne tokove ispravljenog napona



Slika 1.19. Područja rada jednofaznog mosnog spoja usmjerivača

u_d, kada se mijenja kut α izmedju vrijednosti 30° i 150°. Kao što je vidljivo, jednofazni usmjerivač je u stanju da reagira unutar jedne poluperiode na promjenu upravljačkog signala. Pošto vodjenje tiristora može nastupiti samo jedanput u toku jedne poluperiode, usmjerivač ima svojstva diskretnog sistema.



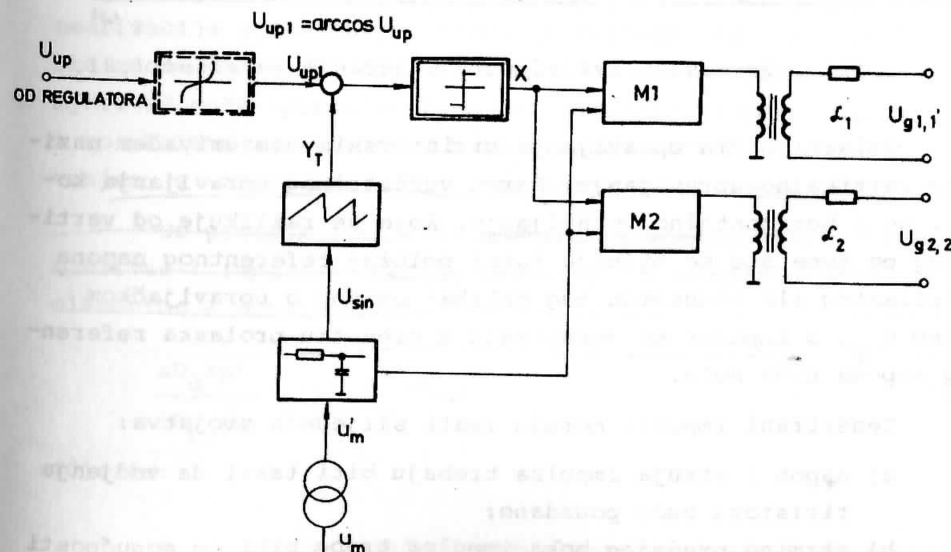
Slika 1.20. Prijelazni tok ispravljenog napona

Iz slike 1.20. je vidljivo da prodje izvjesno vrijeme nakon promjene upravljačke veličine a da se osjeti reakcija na izlazu usmjerivača. Prijelaz iz invertorskog u ispravljački režim rada odvija se brže nego prijelaz iz ispravljačkog u invertorski režim.

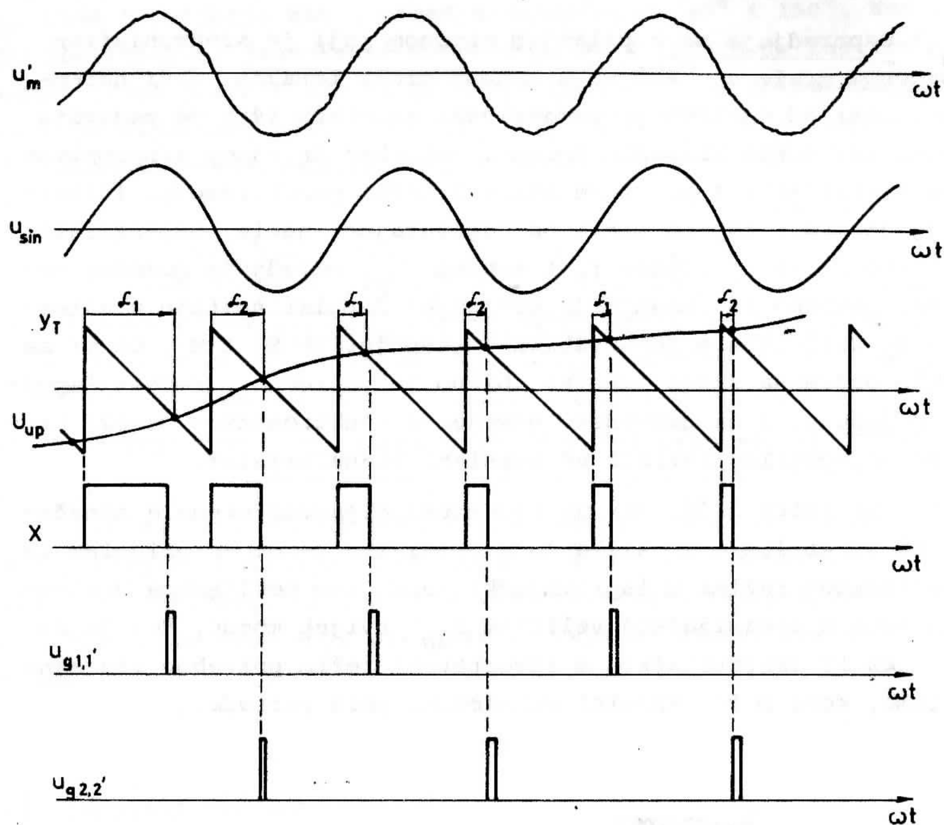
1.3. IMPULSNI UREDJAJ

Upravljanje usmjerivačem vrši se općenito pomoću izlaznog napona elektroničkog regulatora; stoga je potreban impulsni uredjaj (generator impulsa) koji vrši pretvorbu izlaznog napona regulatora u impulse, čije je vremensko pojavljivanje u čvrstoj funkcionalnoj vezi s izlaznim naponom regulatora. Na slici 1.21. prikazana je principna shema izvedbe impulsnog uredjaja. Da bi se kompenzirala nelinearna upravljačka karakteristika tiristorskog usmjerivača $U_d(\alpha)$ (slika 1.18.), ponekad se stavlja izmedju regulatora i impulsnog uredjaja nelinearni član, čija je statička karakteristika upravo jednaka inverznoj upravljačkoj karakteristici usmjerivača. Medjutim, postoje i takvi slučajevi da je potrebno izlazni napon regulatora prilagoditi statičkoj karakteristici impulsnog uredjaja, te se u tom slučaju izmedju regulatora i impulsnog uredjaja stavlja odgovarajuća prilagodna jedinica. Izlazni napon regulatora U_{up} (ili funkcija tog napona U_{upl}) usporedjuje se s pilastim naponom koji je sinhroniziran s naponom mreže u_m. Ako su u naponu mreže izraženi viši harmonici, uslijed djelovanja usmjerivača na mrežu (što je redovita pojava kod mreža konačnih snaga), potrebno je napon sinhronizacije filtrirati, a pri tome nastali fazni pomak izmedju filtriranog napona i napona mreže na odgovarajući način kompenzirati. Sjecište pilastog napona Y_T i napona U_{upl} odredjuje položaj impulsa, odnosno kut kašnjenja vodjenja. Impulsi nastaju u alternativno aktiviranim monostabilnim stupnjevima M_1 i M_2. Da bi se dobila potrebna snaga impulsa obično je potrebno ugraditi impulsno pojačalo, a za galvansko odvajanje elektroničkog dijela kruga od energetskog koristi se impulsni transformator.

Na slici 1.22. dan je vremenski dijagram signala označenih na slici 1.21. Iz slike 1.22. vidljivo je da je prijelaz iz invertorskog režima u ispravljački (npr. kao posljedica diskontinuiteta u upravljačkoj veličini U_{up}) uvijek moguć, dok je za prijelaz iz ispravljačkog u invertorski režim potrebno izvjesno vrijeme, koje može iznositi maksimalno pola periode.



Slika 1.21. Principna shema izvedbe impulsnog uredjaja



Slika 1.22. Vremenski tok signala označenih na slici 1.21.

Opisani način upravljanja tiristorskim usmjerivačem naziva se vertikalno upravljanje. Pored vertikalnog upravljanja koristi se i horizontalno upravljanje, koje se razlikuje od vertikalnog po tome što se mijenja fazni položaj referentnog napona Y_T (pilastog ili sinusoidalnog oblika) ovisno o upravljačkom naponu U_{up}, a impulsi se generiraju u trenutku prolaska referentnog napona kroz nulu.

Generirani impulsi moraju imati slijedeća svojstva:

a) napon i struja impulsa trebaju biti takvi da vodjenje tiristora bude pouzdano;

b) strmina prednjeg boka impulsa treba biti po mogućnosti čim veća jer se time odredjuje točnost trenutka vodjenja tiristora;

c) dužina trajanja impulsa treba biti čim manja kako bi se izbjegla lokalna preopterećenja poluvodičke ćelije tiristora;

d) simetrija obaju impulsa, koji su medjusobno pomaknuti za 180°, treba ležati u čim užim granicama.

Na osnovi izloženog, može se konstatirati da su usmjerivači izuzetno pogodni izvršni elementi za elektromotorne pogone, zahvaljujući prvenstveno velikoj izlaznoj snazi i dobroj upravljivosti. Posebna je pogodnost što se impulsni uredjaj upravlja neposredno pomoću elektroničkog regulatora, koji je na istom nivou snage kao i impulsni uredjaj.

Kod sinteze regulacijskog sistema koji sadrži usmjerivač, postavlja se pitanje kako vjerno opisati dinamičko ponašanje usmjerivača. Poteškoće se javljaju jedanput zbog toga što je vodjenje tiristora diskretan proces (kut kašnjenja vodjenja nije kontinuirana vremenska funkcija), a drugi put što je upravljačka karakteristika usmjerivača nelinearna. Mnogobrojna istraživanja usmjerena na ovu i sličnu problematiku pokušavaju naći opću teoriju zasnovanu na amplitudno-širinskoj modulaciji. Točna analiza dinamičkog ponašanja usmjerivača veoma je složena. Za opisivanje stanja mogu se koristiti nelinearne jednadžbe diferencija. Linearizacija jednadžbi diferencija vrijedi samo za male promjene oko radne točke. To opet vodi na jednostavan rezultat da se usmjerivač može aproksimativno nadomjestiti proporcionalnim članom i to ukoliko se u sistemu koristi regulator s integralnim djelovanjem, a objekt regulacije ima svojstva niskopropusnog filtera.

Uz pretpostavku kontinuirane struje I_d, tiristorski usmjerivač i impulsni uredjaj često se nadomještaju proporcionalnim elementom s mrtvim vremenom:

$$\frac{\Delta U_d(p)}{\Delta U_{up}(p)} = K_t \cdot e^{-T_{mi}p} , \qquad (1-45)$$

gdje je:

K_t - faktor pojačanja impulsnog uredjaja i usmjerivača. Mrtvo vrijeme T_{mi} odnosi se isključivo na usmjerivač, pošto je impulsni uredjaj praktički bez mrtvog vremena. To je vrijeme

statistička veličina uvjetovana diskretnošću upravljanja tiristorima. Budući je mrtvo vrijeme relativno malog iznosa u poredjenju s dominantnim vremenskim konstantama regulacijskog sistema, moguće je nakon razvijanja eksponencijalnog člana $e^{-T_{mi}p}$ u Taylorov red zanemariti sve članove osim linearnog, te se dobije:

$$e^{-T_{mi}p} \doteq \frac{1}{1+T_{mi}p} , \qquad (1\text{-}46)$$

odnosno:

$$\frac{\Delta U_d(p)}{\Delta U_{up}(p)} \doteq \frac{K_t}{1+T_{mi}p} . \qquad (1\text{-}45a)$$

Mrtvo vrijeme se obično računa kao statistička srednja vrijednost prema izrazu:

$$T_{mi} = \frac{1}{2}\ \frac{1}{m \cdot f} , \quad /s/ \qquad (1\text{-}47)$$

gdje je:

f = frekvencija napona napajanja, /Hz/,
m = broj pulzacija ispravljenog napona u toku jednog perioda izmjeničnog napona.

Za jednofazni usmjerivački mosni spoj mrtvo vrijeme iznosi:

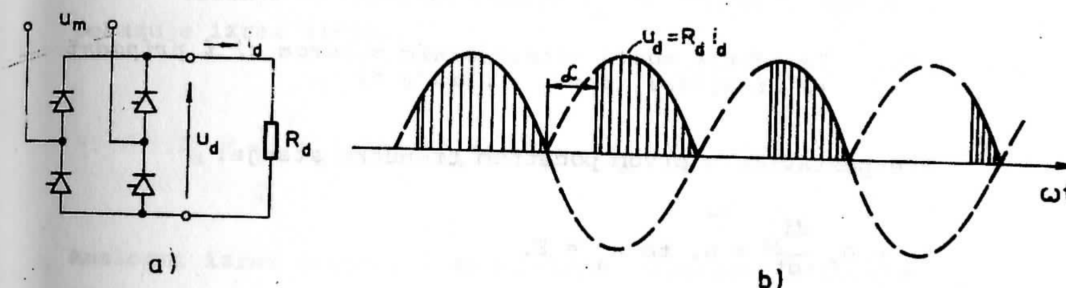
$$T_{mi} = 5 \text{ ms}.$$

1.4. KONTINUIRANI I DISKONTINUIRANI REŽIM VODJENJA TIRISTORSKOG USMJERIVAČA

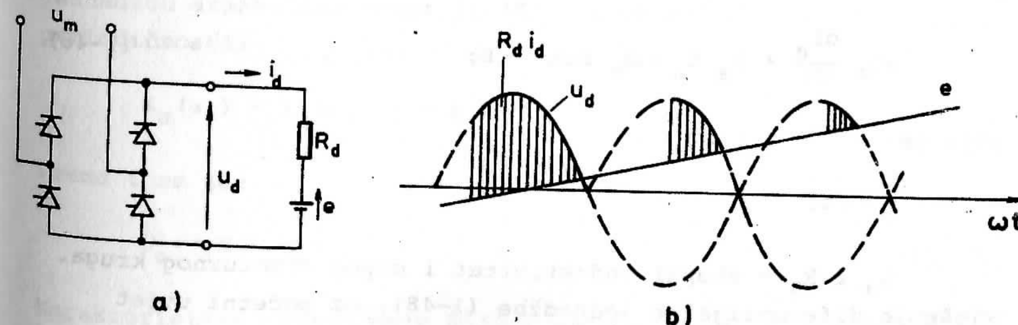
Dosadašnja razmatranja tiristorskog usmjerivača provedena su uz izvjesna pojednostavljenja u svrhu boljeg razumijevanja. Ta pojednostavljenja su se odnosila na pretpostavku kontinuirane i glatke struje I_d, te zanemarenja impedancije mreže. Struja usmjerivača može biti i diskontinuirana, tj. može u odredjenim vremenskim intervalima biti jednaka nuli. Za objašnjenje diskon-

tinuirane struje razmotrimo slučaj opterećenja usmjerivača čistim omskim otporom (slika 1.23.). Istosmjerna struja i_d ima oblik ispravljenog napona u_d. Iz toga slijedi da tiristor prestaje voditi prilikom prolaska mrežnog napona kroz nulu. Zbog pasivnog istosmjernog kruga otpada, naravno, invertorski režim rada.

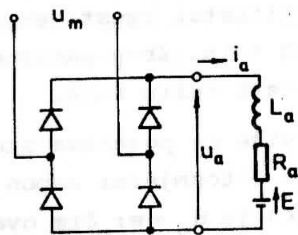
Efekt diskontinuiranosti struje još više se pojačava ako je u seriju s otpornikom spojen promjenljivi istosmjerni napon $e(t) > 0$. Tiristorski par može voditi samo ako je $u_m > e$; čim ovaj uvjet nije ispunjen, tiristori prestaju voditi. Na slici 1.24. prikazan je vremenski tok napona i struje za ovaj slučaj.

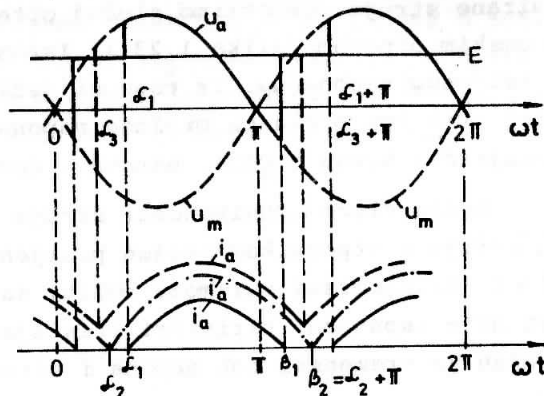


Slika 1.23. Terećenje mosta radnim otporom a) i pripadni valni oblik napona b)



Slika 1.24. - Terećenje mosta radnim otporom i istosmjernim izvorom a) i pripadni valni oblik napona b)





Slika 1.25. Teredenje mosta istosmjernim motorom a) i pripadni valni oblici napona i struje b)

Pretpostavimo u prvom početnom trenutku stanje:

$$i_a = 0, \ \frac{di_a}{dt} = 0, \ \text{te} \ u_a = E.$$

U trenutku $\omega t = \alpha_1$ neka je $u_m = U_m \sin \alpha_1 > E$; tiristorski par (npr. 1-1') provede tako da struja i_a poraste i brzo prekorači vrijednost držanja i_H. Pošto je jedan od tiristorskih parova (npr. 1-1') u stanju vodjenja, armaturni napon motora U_a jednak je trenutnoj vrijednosti napona mreže u_m, te je diferencijalna jednadžba armaturnog kruga motora:

$$\omega L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = U_m \sin\tau - E; \qquad \tau > \alpha_1 , \tag{1-48}$$

gdje je:

$\tau = \omega t,$

L_a i R_a - ukupni induktivitet i otpor armaturnog kruga.

Rješenje diferencijalne jednadžbe (1-48), uz početni uvjet $i_a(\alpha_1) = 0$, glasi:

$$i_a(\tau) = \frac{U_m}{R_a} \frac{1}{\sqrt{1+(\omega T_a)^2}} [\sin(\tau - \text{arctg}\,\omega T_a) - e^{-\frac{\tau-\alpha_1}{\omega T_a}} \sin(\alpha_1 - \text{arctg}\ T_a)]$$

$$- \frac{E}{R_a} [1 - e^{-\frac{\tau-\alpha_1}{\omega T_a}}] . \tag{1-49}$$

gdje je:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}.$$

U trenutku $\beta_1 < \alpha_1 + \Pi$ postiže struja i_a ponovno vrijednost nula ($i_a(\alpha_1) = 0$), pa tiristori prestaju voditi. Struja je jednaka nuli sve dok ne provedu tiristori 2-2' u trenutku $\alpha_1 + \Pi$. U stacionarnom stanju nastaje, dakle, diskontinuirana struja koja se sastoji iz periodičkih kupolastih segmenata.

Srednja vrijednost struje I_a je ovisna o parametrima kako pokazuje izraz (1-50):

$$I_a = \frac{1}{\Pi} \int_{\alpha_1}^{\beta_1} i_a(\tau)dt = I_a(\alpha, U_m, \omega T_a, R_a, E) . \tag{1-50}$$

Analogni izraz vrijedi i za srednju vrijednost istosmjernog napona:

$$U_a = \frac{1}{\Pi} \int_{\alpha_1}^{\beta_1} u_a(\tau)dt. \tag{1-51}$$

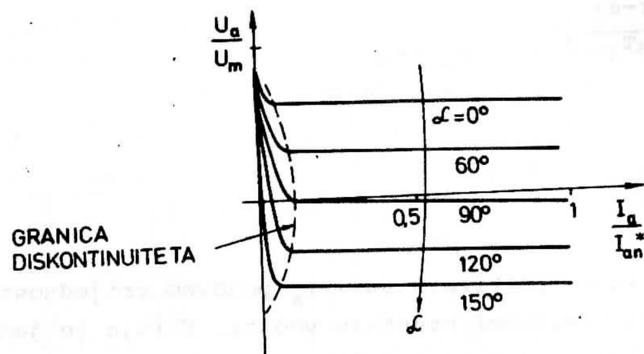
Ovaj integral se dade svesti na oblik izraza (1-50), koristeći jednadžbu armaturnog kruga (1-48), te uzimajući u obzir uvjet periodičnosti:

$$i_a(\alpha_1) = i_a(\alpha_1 + \Pi) = 0. \tag{1-52}$$

Prema tome je:

$$U_a = E + R_a I_a. \tag{1-53}$$

Karakteristika opterećenja $U_a(I_a)$ za α = konst. i promjenljivi protunapon E je nelinearna kod diskontinuirane struje, zbog promjenljivog trajanja vodjenja $\beta_1 - \alpha_1$ (slika 1.26.).



Slika 1.26. Karakteristika opterećenja

Ova činjenica unosi posebne probleme prilikom sinteze pripadnih regulatora istosmjernog motora o čemu nećemo detaljnije govoriti.

Ako se uz prethodne pretpostavke kut kašnjenja vodjenja smanji ($\alpha<\alpha_1$), povećava se amplituda segmenata struje uz istovremeno produljavanje trajanja toka struje. Pri tome nastaje granični slučaj $\alpha=\alpha_2$, kada u trenutku prestanka vodjenja tiristorskog para 1-1' provede par 2-2'; to je granica diskontinuiteta struje.

Iz jednadžbe (1-49) dade se izvesti uvjet kontinuiranosti struje, koji glasi:

$$\alpha_2 = \text{arctg}\omega T_a - \text{arc sin}\left[\frac{E}{U_m}\sqrt{1+(\omega T_a)^2}\ \text{th}\left(\frac{\Pi}{2\omega T_a}\right)\right]. \qquad (1\text{-}54)$$

Prema tome, svakoj vrijednosti protunapona E pripada kut kašnjenja vodjenja α_2 kod kojeg struja dolazi na granicu diskontinuiteta. U specijalnom slučaju za $\omega T_a \geqslant 1$, tj. kod dobrog "gladjenja", vrijedi uvjet izveden iz (1-54):

$$\frac{2}{\Pi} U_m \cos\alpha \geqslant E, \qquad (1\text{-}55)$$

koji kaže da je moguć kontinuirani tok struje ako je napon ispravljača veći od protunapona E.

I_{an}^* - nominalna struja armaturnog kruga motora

Daljnjim smanjenjem kuta kašnjenja vodjenja ($\alpha_3<\alpha_2$) ili pak smanjivanjem protunapona E, struja je u svakom trenutku kontinuirana (slika 1.25.)

Rješenje diferencijalne jednadžbe (1-48) u intervalu $\alpha_3 \leqslant \tau \leqslant \alpha_3+\Pi$ glasi:

$$i_a(\tau) = \frac{U_m}{R_a\sqrt{1+(\omega T_a)^2}}\sin(\tau-\text{arctg}\omega T_a) - \frac{E}{R_a} + \left[i_a(\alpha_3) - \frac{U_m}{R_a\sqrt{1+(\omega T_a)^2}}\cdot\right.$$

$$\left.\cdot\sin(\alpha_3-\text{arctg}\omega T_a) + \frac{E}{R_a}\right] e^{-\frac{\tau-\alpha_3}{\omega T_a}}, \qquad (1\text{-}56)$$

Za slučaj kontinuiranog toka struje mogu se bitno jednostavnije računati srednje vrijednosti napona i struje, pošto su u tom slučaju integrali (1-50) i (1-51) ograničeni na točno jednu poluperiodu. U periodičnom stanju otpada naime utjecaj induktiviteta zbog $i_a(\alpha) = i_a(\alpha+\Pi)$ i vrijedi:

$$U_a(\alpha) = \frac{1}{\Pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\Pi} U_m \sin\tau\, d\tau = \frac{2}{\Pi} U_m \cos\alpha, \qquad (1\text{-}57)$$

$$I_a(\alpha) = \frac{1}{\Pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\Pi} \frac{U_m \sin\tau - E}{R_a}\, d\tau = \frac{U_a - E}{R_a}. \qquad (1\text{-}58)$$

Jednadžba (1-57) je, naravno, identična jednadžbi (1-44). Karakteristika opterećenja za kontinuirani režim rada uz α=konst. i promjenljivi protunapon E je linearna (slika 1.26.). Pretpostavka da se protunapon (protuelektromotorna sila) E u razmatranjima koja su se odnosila na sliku 1.25. promatrao kao stacionarna veličina, opravdava se time što se ta veličina u pogonskim uvjetima mijenja relativno sporo, zbog zamašnih masa motora i radnih mehanizama priključenih na motor.

Zanemarenje impedancije izmjeničnog strujnog kruga (L_m, R_m), a koja se dijelom sastoji od rasipnog induktiviteta i otpora namota ispravljačkog transformatora (ako postoji), a dijelom od vlastite impedancije mreže, ima za posljedicu da je vrijeme komutiranja (vrijeme izmjene vodjenja izmedju pojedinih tiristorskih parova) beskonačno kratko, kao što je i vidljivo na slici 1.17. Za veće snage izmjeničnog izvora napajanja, odnos $\omega L_m/R_m$ iznosi oko 10, te se otpor R_m može zanemariti. Iako je induktivitet L_a (gdje je uključen i induktivitet eventualne prigušnice istosmjernog kruga) mnogo veći od L_m, tokovi struja u tiristorskim granama i u izmjeničnom dovodu ne poprimaju nacrtani skokoviti oblik (slika 1.17.), nego se izgradnja i razgradnja struja tiristora prilikom provodjenja (a time i promjena smjera izmjenične struje i_m) odvija u obliku komutacionog procesa za konačno vrijeme t_k dato aproksimativnom relacijom:

$$t_k = \frac{\gamma_\kappa}{\omega} \doteq \frac{1}{\omega} \arccos(\cos\alpha - \frac{2\omega L_m}{U_m} I_a) - \frac{\alpha}{\omega}, \qquad (1\text{-}59)$$

gdje je:

γ_κ - kut komutacije, /°/.

Komutaciono vrijeme t_k je, kao što pokazuje izraz (1-59), funkcija kuta kašnjenja vodjenja α i srednje vrijednosti struje I_a.

1.5. REGULACIJSKI UREDJAJ

Istosmjerni pogoni napajani preko tiristorskog usmjerivača, kao uostalom i općenito elektromotorni pogoni, reguliraju se skoro isključivo na principu tzv. kaskadne regulacije. To znači da je regulacijski uredjaj izveden u više stupnjeva s odredjenom medjusobnom hijerarhijom. Konkretno, ako se radi o regulaciji brzine vrtnje istosmjernog motora koncipirane na ovom principu, regulacijski uredjaj je izveden od regulatora brzine vrtnje i regulatora armaturne struje s pripadnim mjernim članovima. Pri tome je regulator brzine vrtnje vodeći u odnosu na regulator struje, odnosno regulacijski krug brzine vrtnje je nadredjen regulacijskom krugu armaturne struje. U konkretnom

slučaju, regulacijski krug armaturne struje ima ulogu da zaštiti motor i tiristorski usmjerivač od preopterećenja, kao i da brzo iskopenzira utjecaj smetnji (npr. moment tereta) koje djeluje unutar tog kruga (vidjeti dodatak 3.1).

Regulatori brzine vrtnje i armaturne struje realiziraju se pomoću integriranih operacionih pojačala.

1.5.1. OPERACIONO POJAČALO

Brza i točna regulacija industrijskih pogona i postrojenja bazirana je s jedne strane na napretku postignutom na polju usmjerivačke (tiristorske) tehnike, a s druge strane visokim stupnjem razvoja elektronike za gradnju regulatora i upravljačkih uradjaja. Korištenjem integriranih operacionih pojačala mogu se realizirati pouzdani, jeftini i efikasni sklopovi.

Operaciono pojačalo je istosmjerno naponsko pojačalo koje poprima željene karakteristike u zajedničkom spoju s vanjskom pasivnom mrežom, npr. RC mrežom. Odgovarajućim izborom mreže u ulaznom krugu i u krugu povratne veze pojačala definiraju se statičke i dinamičke karakteristike sklopa.

Idealno operaciono pojačalo ima slijedeća svojstva:

- faktor naponskog pojačanja A_o je beskonačno velik,
- ulazna struja je nula ($I_+ = I_- = 0$), tj. ulazni otpor R_{ul} je beskonačno velik,
- faktor naponskog pojačanja je neovisan o frekvenciji,
- fazni zakret izmedju ulaza i izlaza je neovisan o frekvenciji,
- izlazni otpor R_{iz} je nula,
- istofazno potiskivanje je beskonačno veliko,
- struja namještanja i napon namještanja su nula,
- temperaturna ovisnost i drift ne postoje.

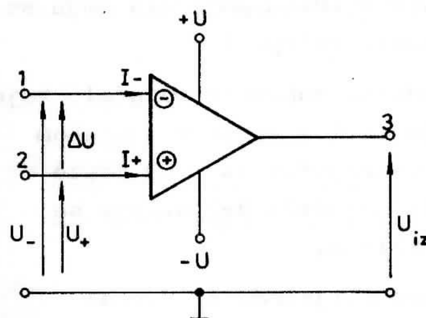
(Objašnjenje pojmova korištenih uz operaciono pojačalo nalazi se u dodatku 3.2).

Današnja integrirana operaciona pojačala se po svojim karakteristikama približavaju svojstvima idealnog operacionog

pojačala. Da bi se dobio osjećaj realnih podataka o operacionom pojačalu navedimo neke podatke za integrirano operaciono pojačalo tipa 741:

- faktor naponskog pojačanja $A_o = 10^5$,
- ulazni otpor $R_{ul} = 1M\Omega$,
- izlazni otpor $R_{iz} = 100\Omega$,
- maksimalna izlazna struja $i_{iz} = 2$ mA,
- istofazno potiskivanje je 10^4,
- frekventni opseg uz pojačanje A=1 je 1 MHz,
- struja namještanja je 5 nA,
- drift napona namještanja je 5 $\mu V/^oC$.

Unutrašnja struktura operacionog pojačala u većini slučajeva ne zanima njegovog korisnika i mi ćemo ga stoga razmatrati polazeći od njegova simbola (slika 1.27.).

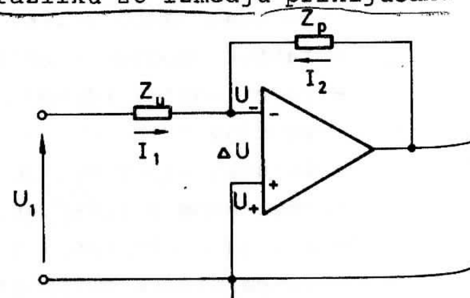


Slika 1.27. Operaciono pojačalo

Operaciono pojačalo ima 2 ulazna priključka (1 i 2), jedan izlazni priključak (3), priključke za negativni i pozitivni napon napajanja kao i priključke za podešavanje karakteristike pojačala (na slici 1.27. nisu naznačeni).

Svi naponi na slici 1.27. odnose se na zajednički potencijal, općenito potencijal mase. Operaciono pojačalo pojačava naponsku razliku ΔU izmedju priključaka 1 i 2 (diferencijalno pojačalo).

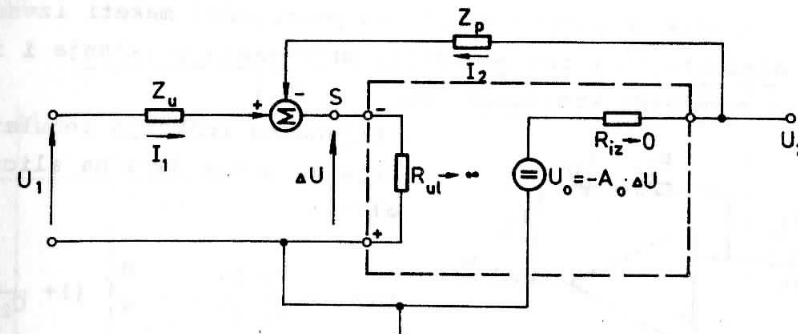
Priključak 1 predstavlja invertirajući ulaz a priključak 2 neinvertirajući. Ako npr. nastupi na priključku 1 pozitivna naponska promjena u odnosu na priključak 2, može se na izlazu 3 registrirati negativna naponska promjena. Prema tome, invertirajući ulaz obrće predznak, što odgovara faznom zakretu od 180°. Neinvertirajući ulaz ne obrće predznak.



Slika 1.28. Operaciono pojačalo s pridruženom mrežom

Uz pretpostavku idealnog operacionog pojačala odredimo sada prijenosnu funkciju sklopa prikazanog na slici 1.28.

Nadomjesna shema za sklop prikazan na slici 1.28. je dana na slici 1.29.



Slika 1.29. Nadomjesna shema sklopa sa slike 1.28

Narine li se na ulaz sklopa sa slike 1.28. (odnosno slike 1.29.) napon U_1, u prvom trenutku će biti u točki S napon:

$$U_- = \Delta U = \frac{Z_p}{Z_p + Z_u} U_1 \qquad (1\text{-}60)$$

Ovaj napon će se pojačati, što ima za posljedicu da izlazni napon brzo naraste u drugu stranu. Izlazni napon se mijenja dotle dok ulazni napon U_- ne postane praktički jednak nuli. Ovaj proces uspostavljanja stacionarnog stanja odvija se relativno brzo u poredjenju s dominantnim procesima regulacijskog kruga. Izlazni napon U_2 može se dobiti iz jednadžbe čvora za točku S (virtuelna elektronička nula):

$$I_1 + I_2 = 0, \qquad (1\text{-}61a)$$

$$\frac{U_1}{Z_u} + \frac{U_2}{Z_p} = 0, \qquad (1\text{-}61b)$$

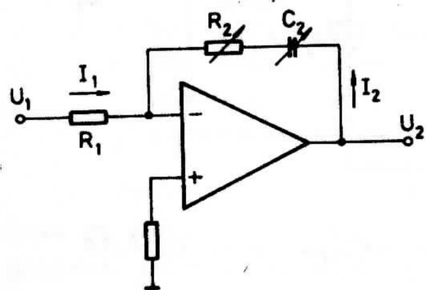
odnosno:

$$G(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = -\frac{Z_p}{Z_u}, \qquad (1\text{-}62)$$

tj. prijenosna funkcija pojačala kojem je pridružena vanjska mreža definirana je odnosom impedancije u povratnoj vezi i impedancije u ulaznom krugu pojačala. Na osnovi toga može se operaciono pojačalo shvatiti kao izvor energije za vanjsku, njemu pridruženu, pasivnu mrežu.

1.5.2. REGULATOR BRZINE VRTNJE ISTOSMJERNOG MOTORA

Regulator brzine vrtnje na postojećoj maketi izveden je s PI djelovanjem i ima mogućnost mijenjanja pojačanja i integralne vremenske konstante (slika 1.30.).



Slika 1.30. Regulator brzine vrtnje

Prijenosna funkcija regulatora, čija je shema dana na slici 1.30, glasi:

$$G(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = - \frac{R_2}{R_1}\left(1+ \frac{1}{C_2 R_2 p}\right) = -$$

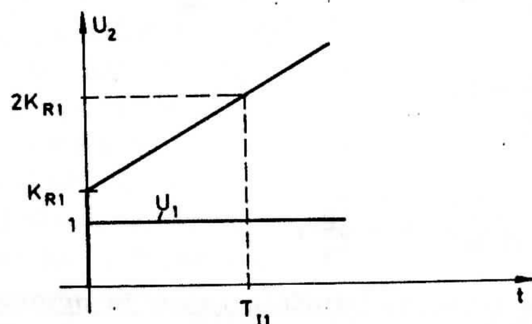
$$K_{R1}\left(1 + \frac{1}{T_{p1}p}\right) = - K_{R1}\,\frac{1+T_{I1}p}{T_{I1}p} \quad (1\text{-}63)$$

gdje je:

K_{R1} - pojačanje regulatora brzine vrtnje,

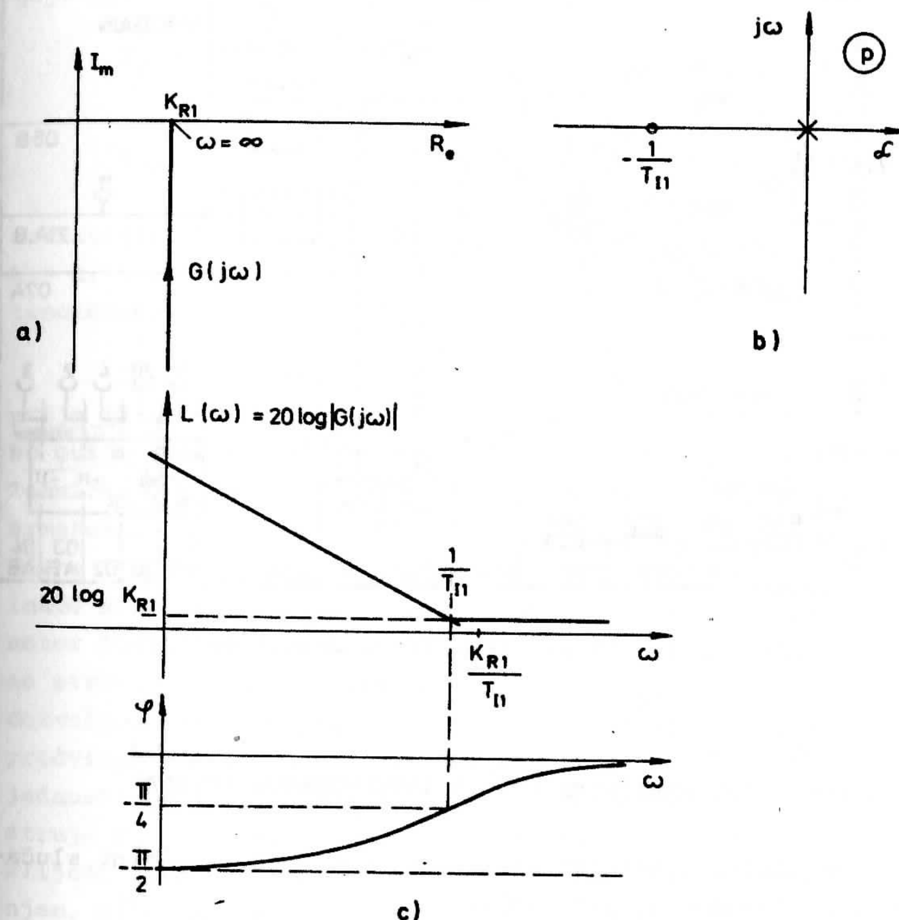
T_{I1} - integralna vremenska konstanta regulatora brzine vrtnje.

Odziv regulatora s PI djelovanjem na jediničnu skokovitu funkciju dan je na slici 1.31.



Slika 1.31. Odziv PI regulatora na skokovitu funkciju

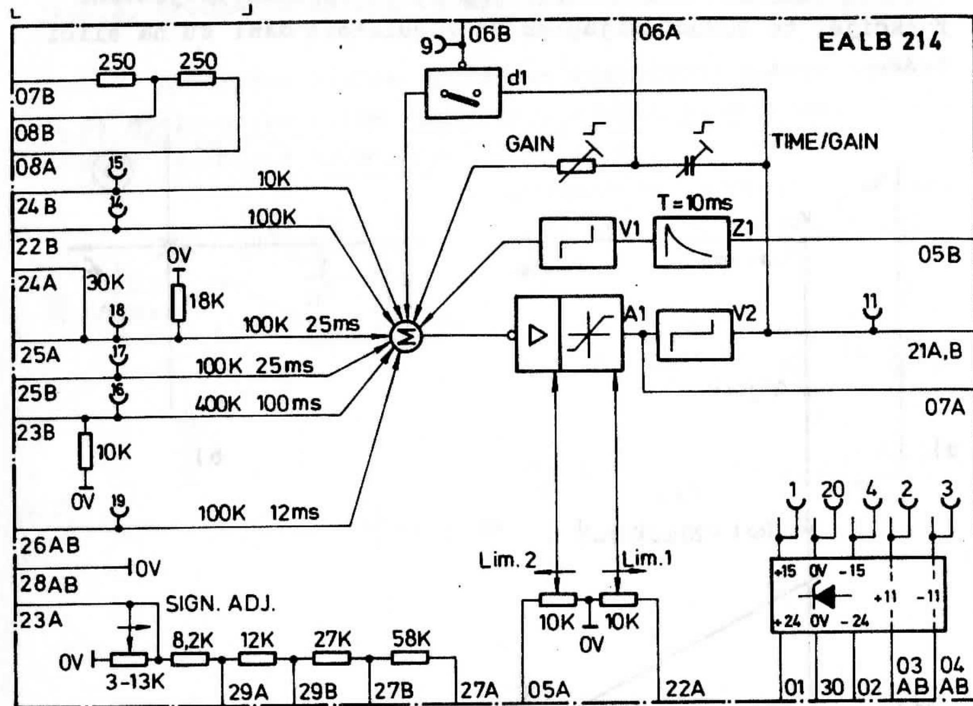
Polarni dijagram, položaj polova i nula prijenosne funkcije, te Bodeov dijagram PI regulatora dani su na slici 1.32.



Slika 1.32. Polarni dijagram a), položaj polova b) i Bodeov dijagram c) PI regulatora

Modul regulatora brzine vrtnje (sl.1.33.) ima više ulaza, čime je ostavljena projektantu regulacijske opreme mogućnost izbora, a s druge strane opća je tendencija da moduli budu univerzalni, kako bi se mogli koristiti za razne pogone.

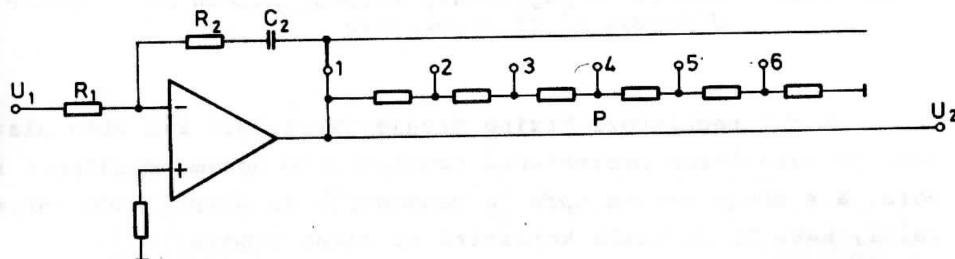
Objašnjenje dodatnih krugova regulatora brzine vrtnje koje sadrži modul nalazi se u dodatku 3.3.



Slika 1.33. Modul regulatora brzine vrtnje

1.5.3. REGULATOR ARMATURNE STRUJE ISTOSMJERNOG MOTORA

Regulator armaturne struje je, takodjer, u većini slučajeva PI djelovanja (slika 1.34.).



Slika 1.34. Regulator armaturne struje

Prijenosna funkcija regulatora armaturne struje je:

$$\frac{U_2(p)}{U_1(p)} = - K_{R2}\left(1 + \frac{1}{T_{I2}p}\right), \qquad (1\text{-}64)$$

gdje je:

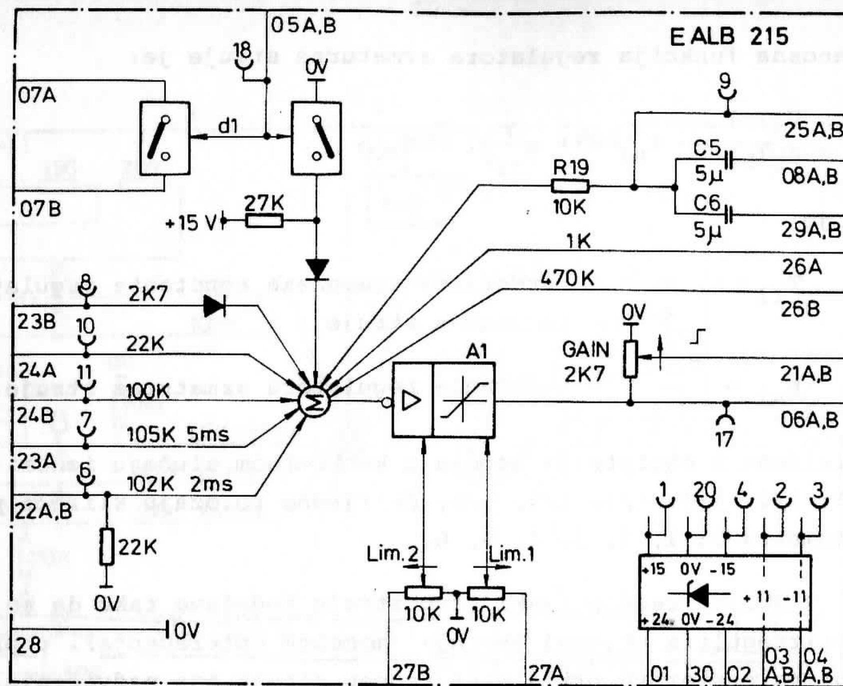
$T_{I2} = R_2 C_2$ - integralna vremenska konstanta regulatora armaturne struje,

$K_{R2} = \frac{R_2}{kR_1}$ - pojačanje regulatora armaturne struje

Koeficijent k djelitelja napona u konkretnom slučaju iznosi: k = 1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, dosljedno položaju klizača potenciometra P: 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Iako se regulacijski krug struje podešava tako da se čim prije izregulira utjecaj smetnje (momenta opterećenja), u praksi se obično preferira prijelazni proces struje bez nadvišenja. Tehnička osnova za to je da maksimalna brzina porasta struje armaturnog kruga većinom zahtijeva duža vremena porasta, odredjena iznosom armaturne vremenske konstante T_a, od vremena koja inače mogu dati upravljački sklopovi. Ilustracije radi, neka motor ima dozvoljenu brzinu porasta struje 200 I_{an}/s, te neka se struja promijeni s vrijednosti 0 na $2I_{an}$, tada je minimalno dozvoljeno vrijeme porasta t_1 = 10 ms, ukoliko u krugu nije predvidjeno ograničenje struje. Zbog toga se za uobičajene vrijednosti parametara motora uzima faktor pojačanja regulatora struje $K_{R2}<1$. Zbog činjenice da je faktor pojačanja K_{R2} malen, slijedi opravdanje za upotrebu regulatora struje s PI djelovanjem, pošto se želi u većini slučajeva potpuno izregulirati utjecaj smetnje prouzročene momentom opterećenja. Modul regulatora armaturne struje prikazan je na slici 1.35.

Kao što je vidljivo sa slike 1.35., pojačalo regulatora struje ima krug za ograničenje njegovog izlaznog napona (analogno regulatoru brzine vrtnje), tj. upravljačkog napona za impulsni uredjaj. Na taj način je moguće direktno utjecati na vrijednost ispravljenog napona tiristorskog usmjerivača, odnosno brzine vrtnje motora.



Slika 1.35. Modul regulatora armaturne struje

1.5.4. POVRATNE VEZE

Prilikom zatvaranja povratnih veza regulacijskih krugova, potrebno je izvršiti izbor mjernog člana regulirane veličine, te odgovarajuće prilagodjenje izmjerenog signala signalima regulatora.

1.5.4.1. POVRATNA VEZA REGULACIJSKOG KRUGA BRZINE VRTNJE

Za mjerenje brzine vrtnje obično se koristi istosmjerni ili izmjenični tahogenerator montiran na osovinu motora. Ovaj mjerni član pretvara brzinu vrtnje u napon:

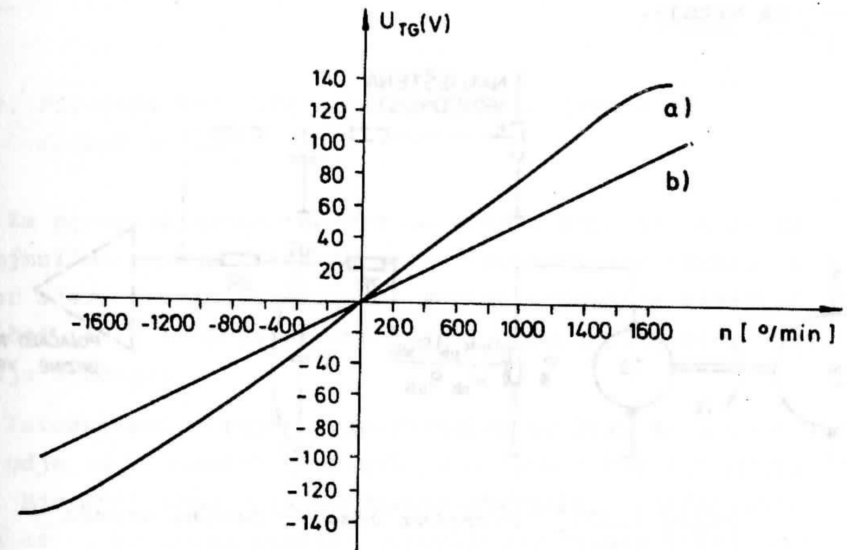
$$U_{TGO} = K_e \, \phi \Omega, \qquad (1\text{-}65)$$

gdje indeks TGO znači da se radi o neopterećenom tahogeneratoru.

Inducirani napon tahogeneratora je proporcionalan brzini vrtnje. Prema tome, prijenosna funkcija tahogeneratora je:

$$\frac{U_{TGO}}{\Omega} = K_e \, \phi = K_{TG}' \qquad /Vs/. \qquad (1\text{-}66)$$

Statička karakteristika tahogeneratora dana je na slici 1.37.



Slika 1.36. Statička karakteristika neopterećenog a) i opterećenog b) tahogeneratora

Mora se imati na umu da je napon na stezaljkama opterećenog tahogeneratora manji od induciranog napona U_{TGO}. Naime, u stacionarnom stanju je tahogenerator opterećen strujom:

$$I_{TG} = \frac{U_{TGO}}{R_{TG} + R_T},$$

gdje je:

R_{TG} - unutrašnji otpor tahogeneratora,

R_T - opteretni otpor,

tako da je napon na stezaljkama:

$$U_{TGopt} = U_{TGo} - \frac{R_T}{R_{TG}+R_T} U_{TGo} = U_{TGo} (1 - \frac{R_T}{R_{TG}+R_T}) . \quad (1-67)$$

Mijenja li se smjer vrtnje, mijenja se i polaritet mjerenog signala. Ovo vrijedi samo za istosmjerni tahogenerator. U odredjenim specijalnim slučajevima se koristi izmjenični tahogenerator s ispravljačem. Tada je izlazni napon uvijek pozitivan, neovisno od smjera vrtnje.

Slika 1.37. Povratna veza po brzini vrtnje

Budući je istosmjernom naponu tahogeneratora superponirana izmjenična komponenta prouzročena mehaničkom konstrukcijom, te često ne baš dobrom montažom tahogeneratora na osovinu motora, potrebno je filtrirati signal tahogeneratora. Osim toga, signal tahogeneratora treba prilagoditi naponskim nivoima koji se susreću u regulatoru (obično ± 15 V maksimalno), tako da povratna veza po brzini vrtnje izgleda kao na slici 1.37.

Prijenosna funkcija grane povratne veze (uz zanemarenje utjecaja opterećenja tahogeneratora) glasi:

$$G_b(p) = \frac{U_2(p)}{\Omega(p)} = \frac{K_{TG} \, k_{pb}}{2} \; \frac{1}{1 + RCp} = \frac{K_b}{1+T_b p} , \quad (1-68)$$

gdje je:

k_{pb} - faktor prilagodjenja signala tahogeneratora (k_{pb}<1),

T_b - vremenska konstanta filtera tahogeneratora, /s/,

K_b - faktor pojačanja grane povratne veze regulatora brzine vrtnje, /Vs/.

Prilagodjenje signala tahogeneratora vrši se eksperimentalno na taj način da se uz maksimalni iznos namještene vrijednosti regulirane veličine zakreće potenciometar P_B (sl.1.37.), sve dok se ne dobije maksimalna (dozvoljena) vrijednost brzine vrtnje.

1.5.4.2. POVRATNA VEZA REGULACIJSKOG KRUGA ARMATURNE STRUJE MOTORA

Za mjerenje armaturne struje motora koristi se istosmjerni ili izmjenični strujni transformator. Istosmjerni strujni transformator mjeri struju istosmjerne strane napajanja armature, dok izmjenični strujni transformator mjeri struju izmjenične strane napajanja armature.

Istosmjerni strujni transformator se koristi u onim slučajevima gdje su rigorozni zahtjevi na brzinu i točnost mjerenja struje. Mjerenje struje istosmjernim strujnim transformatorom zasniva se na principu strujno upravljivog transduktora. Principna izvedba ovog mjernog člana te njemu pripadna statička karakteristika dani su na slici 1.38.

Slika 1.38. Principna izvedba a) i statička karakteristika b) istosmjernog strujnog transformatora

Unutar područja $0 \leq I_a \leq |I_{amax}|$ ispravljeni izlazni napon je:

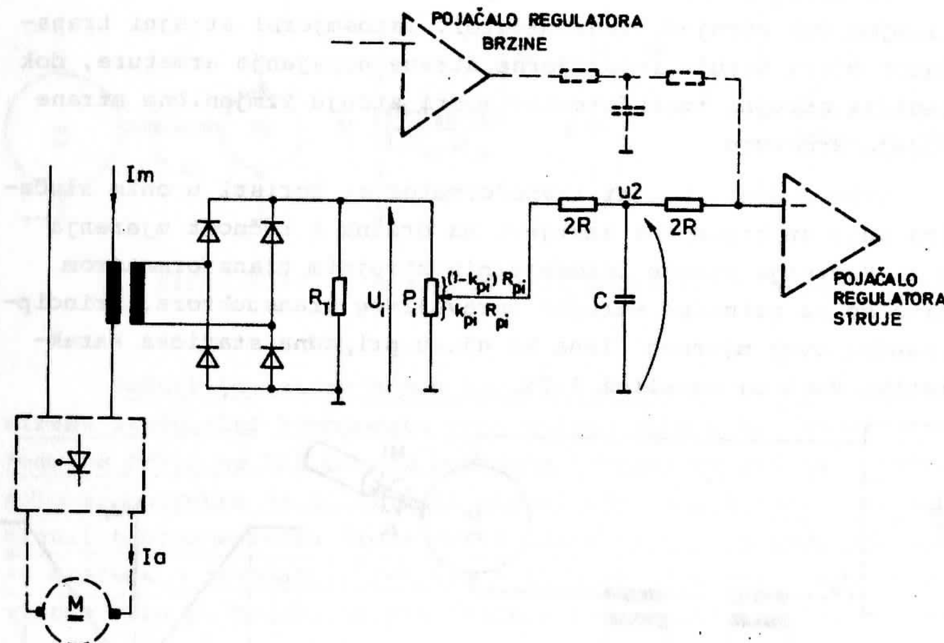
$$U_i = k_i\ I_a, \qquad (1-69)$$

gdje je:

$k_i = \frac{U_i}{I_a}$ - konstanta strujnog transformatora [V/A] .

Opteretni otpornik R_T je niskoomske vrijednosti, te se na taj način može zanemariti utjecaj opterećenja regulatorom.

Mjerni član struje prikazan na slici 1.38. može mjeriti struju obaju smjerova što je važno za reverzivne elektromotorne pogone.



Slika 1.39. Povratne veza po armaturnoj struji

Prijenosna funkcija grane povratne veze regulatora struje glasi:

$$G_i\,(p) = \frac{U_2\,(p)}{I_m\,(p)} = \frac{k_i\ k_{pi}}{2}\ \frac{1}{1+RCp} = K_i\ \frac{1}{1+T_{fi}p}\ , \qquad (1-70)$$

gdje je:

k_{pi} - faktor prilagodjenja signala povratne veze struje (k_{pi}<1),

K_i - faktor pojačanja grane povratne veze regulatora struje [V/A] ,

T_{fi} - vremenska konstanta filtera struje, /s/.

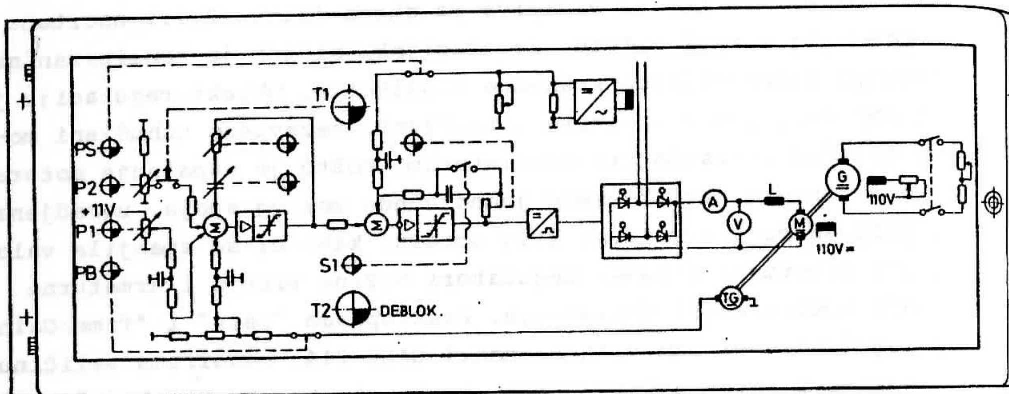
Filtriranje signala povratne veze struje je potrebno zbog toga, jer je napon U_i punovalno ispravljeni napon, tj. sadrži izmjenične komponente.

2. OPIS RUKOVANJA MAKETOM SISTEMA REGULACIJE BRZINE VRTNJE

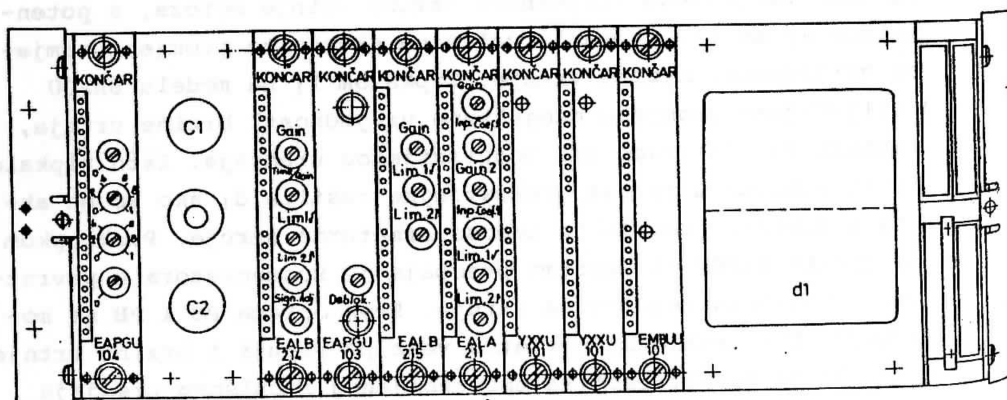
Maketa sistema regulacije brzine vrtnje namijenjena je za upotpunjavanje znanja s područja teorije i primjene automatske regulacije. Kao što je vidljivo iz sheme (slika 2.1.) nacrtane na prednjoj strani makete, regulacijski sistem je koncipiran na principu višepetljaste kaskadne regulacije. Objekt regulacije je istosmjerni, preko armature upravljani, nezavisno uzbudjeni motor teređen istosmjernim generatorom. Pošto je napajanje motora izvedeno preko tiristorskog jednofaznog mosnog spoja, ugradjena je prigušnica u armaturni krug motora, kako bi se smanjila valovitost armaturne struje. Regulatori brzine vrtnje i armaturne struje motora su PI djelovanja. Preklopkama "Gain" i "Time/Gain" na regulatoru brzine vrtnje (modul EALB 214) odabiremo veličinu pojačanja i integracione vremenske konstante. Preklopkom "Gain" na regulatoru struje (modul EALB 215) odabiremo veličinu pojačanja regulatora struje. Potenciometrom P_1 na modelu EAPGU 104 podešavamo namještenu vrijednost brzine vrtnje motora, a potenciometrom P_2 na istom modulu veličinu skokovite promjene namještene vrijednosti brzine vrtnje. Tipkalom T_1 na modelu EAPGU 103 uključujemo promjenu namještene vrijednosti brzine vrtnje, a tipkalom T_2 blokiramo rad regulacijskog uredjaja. Isto tipkalo služi za deblokadu releja prekostrujne zaštite d_1 ako se on aktivira u slučaju prevelikog iznosa armaturne struje. Preklopkom S_1 na modulu EAPGU-103 vršimo prespajanje kondenzatora u povratnoj vezi pojačala regulatora struje. Preklopkama PS i PB na modulu EAPGU 104 prekidamo povratne veze po struji i brzini vrtnje. Obzirom da je karakteristika upotrebljenog impulsnog uredjaja $\alpha = f(U_{up})$ takva da je za U_{up}=oV $\alpha=\alpha_{min}$, a za U_{up}= - 10,5V $\alpha = \alpha_{max}$, ne može se direktno regulatorom struje upravljati impulsni uredjaj.

Zbog toga je ugradjena prilagodna jedinica EALA 211 ispred impulsnog uredjaja. Prilagodna jedinica ima takvu karakteristiku da promjena napona na njenom ulazu od 0V do 10,5V uzrokuje

promjenu napona na njenom izlazu od -10,5 V do oV, što znači i promjenu kuta vodjenja α od α_{max} do α_{min}. Klizač potenciometra Coef 2 treba postaviti na krajnji položaj, a zatim finim podešavanjem ostvariti željenu karakteristiku prilagodne jedinice. Pri tome Lim 2 (ograničenje napona na izlazu regulatora struje) treba postaviti takodjer na krajnji desni položaj (-11V). Sklopnici



a)

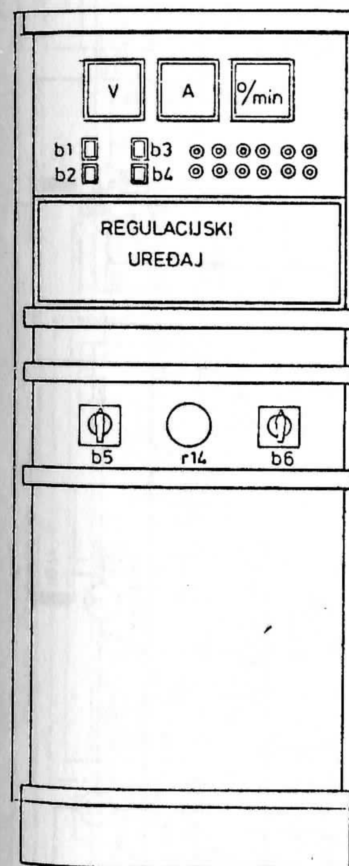


b)

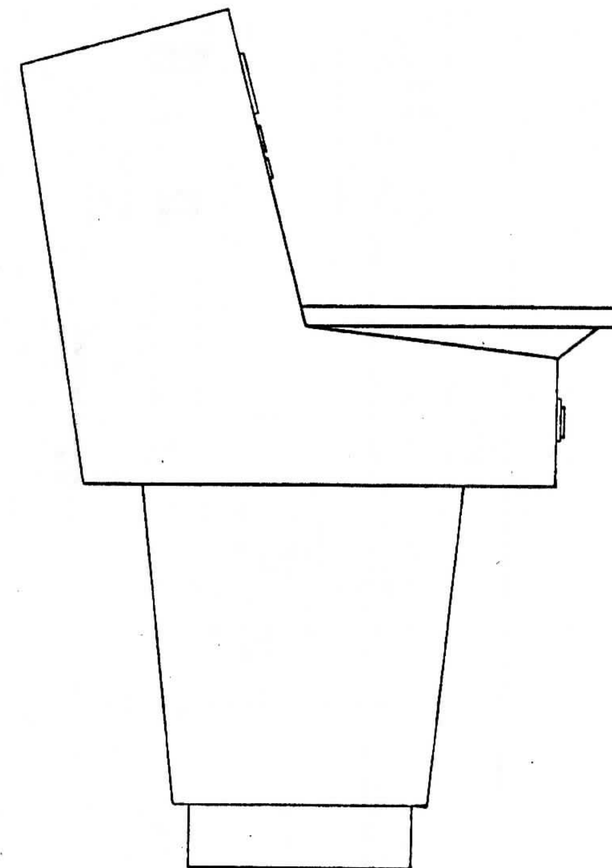
Slika 2.1. Shema nacrtana na prednjoj strani maketa a) i regulacijski uredjaj s oznakama modula b)

C_1 i C_2, relej d2 (sl.2.3.) i tipkala b_1-b_4 (sl.2.2.) predstavljaju "logiku" kojom se osigurava odredjeni redoslijed uključivanja i isključivanja glavnih i pomoćnih energetskih strujnih krugova.

Pritiskom na tipkalo b_2 uklapa sklopnik C_2 (sl.2.3.). Uklopljeni sklopnik C_2 osigurava napajanje za elektroniku i uzbudu motora i generatora, samodržanje i uvjete za uključenje armatornog kruga (zatvoreni kontakt 1-2 sklopnika C_2). Relej poduzbudne zaštite d2 indicira postojanje uzbudne struje motora i uklapa svoje kontakte 4-7. Zatvoreni kontakti 1-2 sklopnika C_2 i 4-7 releja su uvjet za uključenje armaturnog kruga. Pritiskom na tipkalo b3 (sl.2.2.) uključi se sklopnik C_1 (sl.2.3.). Uključivanje sklopnika C_1 osigurava napajanje za armaturni krug motora, samodržanje i deblokadu regulatora brzine vrtnje i struje.



a)



b)

Slika 2.2. Izgled makete u nacrtu a) i bokocrtu b)

Slika 2.3. Shema energetskog dijela sistema regulacije brzine vrtnje

Slika 2.4. Blokovski prikaz regulacijskog uredjaja sistema regulacije brzine vrtnje

Terećenje motora vrši se indirektno preko terećenja generatora. Nakon povezivanja izvoda 5 i 6 na prednjoj ploči makete i uključivanja sklopke b5 (sl.2.2.), višepoložajnom preklopkom b6 uključujemo zavisno o položaju 1 do 6 sve manji i manji opteretni otpor u armaturi generatora (sl.2.3.), odnosno sve veće i veće opterećenje motora. Kontinuiranu promjenu tereta moguće je postići pomoću potenciometra r_{14} u uzbodnom krugu generatora. Na prednjoj ploči makete izvedene su mjerne točke za sve važnije veličine sistema.

Pokazni instrumenti na maketi su:

V - voltmetar armaturnog napona motora,
A - ampermetar armaturne struje motora,
o/min - instrument za pokazivanje brzine vrtnje motora.

Slika 2.4. daje pregled medjusobnih veza elektroničkih modula regulacijskog uredjaja sistema.

<u>Tehnički podaci elektromotornog pogona</u>

- *Istosmjerni motor*

Tip		IC-93
Snaga		0,5 kW
Napon		220 V
Brzina vrtnje		1500 o/min
Uzbuda	strana	110 V
Oblik		B 3
Zaštita		IP-23
Prigradjeni tahogenerator		W 4001

- *Istosmjerni generator*

Tip		IC-93
Snaga		0,3 kW
Napon		231 V
Brzina vrtnje		1500 o/min
Uzbuda	strana	110 V
Oblik		B 3
Zaštita		IP 23

- *Tiristorski usmjerivač (jednofazni punoupravljivi most)*

Priključni napon	250 V, 50 Hz
Istosmjerni izlaz	0-225,2 V, 5A

V J E Ž B E

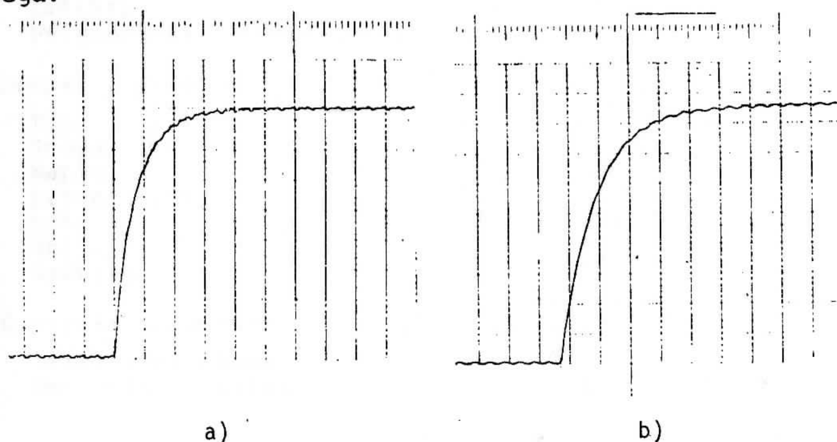
VJEŽBA 2.1.: STATIČKE I DINAMIČKE KARAKTERISTIKE OTVORENOG SISTEMA REGULACIJE BRZINE VRTNJE ISTOSMJERNOG MOTORA

Za sintezu regulacijskog sistema, te analizu njegovog ponašanja, potrebno je poznavati statičke i dinamičke karakteristike svih članova sistema. Budući je struktura objekta regulacije (motora) poznata (poglavlje 1.), preostaje nam da odredimo njegove regulacijske parametre. Za zatvoreni regulacijski sistem potrebno je poznavati i parametre mjernih članova.

2.1.1. PRIPREMA ZA VJEŽBU

1. Iz nominalnih podataka o motoru danih u poglavlju 2. te uputa za odredjivanje parametara motora danih u poglavlju 1.1.3., treba odrediti koeficijent protuelektromotorne sile K_e i koeficijent K_M.

   NAPOMENA: $R_a \doteq 9,78\Omega$.
2. Iz odziva struje armaturnog kruga (slika 1.) treba odrediti armaturnu vremensku konstantu T_a. Objasnite razliku u vrijednosti vremenske konstante T_a očitane iz odziva armaturne struje bez i s uključenom uzbudom motora. Koju vrijednost vremenske konstante T_a je ispravnije odabrati za radni režim i zbog čega?

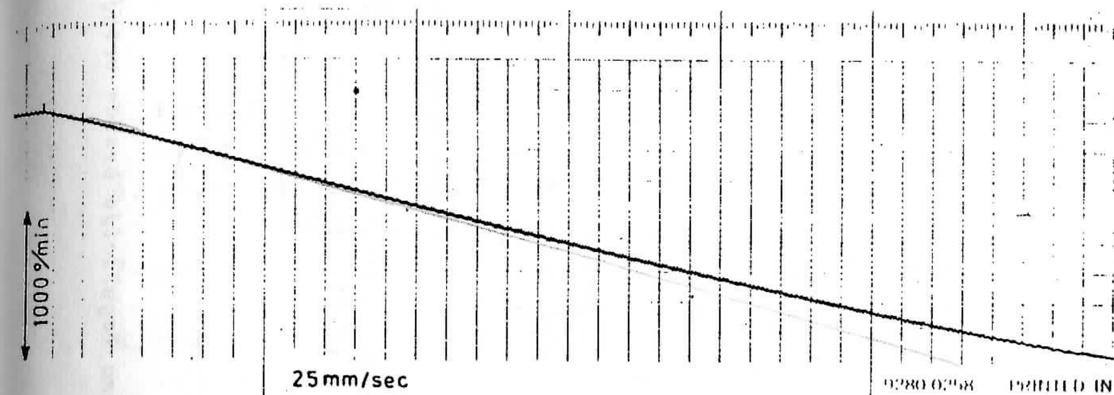


Raster: vertikalno 5 mV/div; horizontalno 125 mm/sec

Slika 1. Odziv armaturne struje bez uzbude a) i s uzbudom b)

3. Iz pokusa zaustavljanja (slika 2.) treba odrediti elektromehaničku vremensku konstantu T_m na osnovi uputa datih u poglavlju 1.1.3.

   NAPOMENA: $P_k \doteq 92,2$ W kod n = 1000 °/min .



Slika 2. Brzina vrtnje motora prilikom pokusa zaustavljanja

4. Odredite korijene nazivnika prijenosne funkcije istosmjernog motora, koristeći izračunate parametre.

5. Navedite tipične slučajeve terećenja usmjerivača kod kojih nastupa diskontinuirano vodjenje usmjerivača; objašnjenje ilustrirati pripadnim valnim oblicima napona i struje.

2.1.2. SNIMANJE STATIČKE KARAKTERISTIKE ISPRAVLJAČA I IMPULSNOG UREDJAJA

Snimanje statičke karakteristike ispravljača i impulsnog uredjaja vrši se prema shemi danoj na slici 3. Prije snimanja potrebno je:

1. potenciometar P_1 postaviti na minimalni iznos (krajnji lijevi položaj);
2. preklopke POJAČANJE (GAIN) i VRIJEME/POJAČANJE (TIME/GAIN) regulatora brzine vrtnje, te preklopku POJAČANJE (GAIN) regulatora struje, postaviti u krajnji lijevi položaj;

Slika 3. Blokovski prikaz kompletnog sistema regulacije brzine vrtnje

3. preklopkom S_1 prespojiti kondenzator u povratnoj vezi pojačala regulatora struje;
4. preklopkama PB i PS isključiti povratne veze brzine vrtnje i armaturne struje;

NAPOMENA: Operacijama 1 do 4 se postiglo da je izlazni napon regulatora armaturne struje, tj. upravljački signal za impulsni uredjaj, jednak nuli.

5. potenciometar Lim 2 na modulu EALA 211 postaviti u krajnji desni položaj;
6. potenciometar COEF 2 na modulu EALA 211 postaviti takodjer u krajnji desni položaj (+11V);
7. povezati točke 5 i 6 na pultu spojnom žicom, te preklopkom b5 uključiti armaturni krug generatora;
8. potenciometar r_{14} u uzbudnom krugu generatora postaviti na srednji položaj;
9. uključiti napajanje pogona prema uputama iz poglavlja 2.;
10. zakretanjem potenciometra COEF 2 u lijevo provjeriti da li se motor počinje vrtjeti;
11. jednom sondom osciloskopa spojiti se na ispitnu točku T_{11} jedinice EALA 211, a drugom sondom na ispitnu točku T_7 iste jedinice;
12. uz maksimalno opterećenje motora (b6 u položaju 6) zakretati potenciometar COEF 2 sve dotle dok struja ne dodje na granicu diskontinuiteta.

ZADATAK

1. Snimiti statičku karakteristiku $U_a=f(U_{up})$ u području kontinuiranog režima rada ispravljača uz maksimalno opterećenje motora. Rezultate mjerenja unijeti u tablicu 1.

   Uputa: $t\alpha$ odrediti iz valnog oblika napona na izlazu tiristorskog ispravljača, te α izračunati iz t_α. Zbog nelinearne karakteristike ispravljača potrebno je armaturnu struju motora I_a držati konstantnom. To se postiže zakretanjem potenciometra r_{14}.

U_{up} [V]	0,6	1,3	1,8	2,5	3	3,4	3,8			
U_a [V]	150	140	135	125	100	79	55			
t_α [ms]										
α [°]	36°	43,2	46,8	49,5	50,4	51 ~~47~~	53 ~~56,8~~			
n [°/min]	910	890	820	750	610	490	300			
I_a [A]	2,02	1,99	1,9	1,8	1,45	1,2	0,9			

Tablica 1.

2. Izračunati pojačanje $K_t \frac{\Delta U_a}{\Delta U_{up}}$ za radnu točku:

   a) $U_a = 160$ V,
   b) $U_a = 180$ V,
   c) $U_a = 200$ V,
   d) $U_a = 220$ V.

3. Snimiti statičku karakteristiku $U_a = f(U_{up})$ u praznom hodu motora, odnosno u diskontinuiranom režimu rada ispravljača. Rezultate mjerenja unijeti u tablicu 2.

U_{up} [V]	128	2,8	3,2	3,6	4,8					
U_a [V]	2,2	122	115	109	95					
t_α [ms]										
α [°]	36									
n [°/min]	910	850	850	790	690					
I_a [A]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3					

Tablica 2.

4. Izračunati pojačanje $K_t = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_{up}}$ za radnu točku:

   a) $U_a = 160$ V,
   b) $U_a = 180$ V,
   c) $U_a = 200$ V,
   d) $U_a = 220$ V.

5. Komentirajte razliku s obzirom na pojačanje K_t za slučaj kontinuiranog i diskontinuiranog režima rada ispravljača.

6. Zbog čega ne može nastupiti invertorski režim rada tiristorskog ispravljača?

2.1.3. ODREDJIVANJE KOEFICIJENATA POJAČANJA MJERNIH ČLANOVA

ZADATAK

7. Prema shemi prikazanoj na slici 3. te uz isti položaj preklopki i potenciometara kao u poglavlju 2.1.2., treba odrediti koeficijent pojačanja tahogeneratora K_{TG}. Brzinu vrtnje motora upravljati pomoću potenciometra COEF 2. Rezultate mjerenja unijeti u tablicu 3.

n [°/min]	920	850	800
n [s^{-1}]			
U_{TG} [V]	12,5	11,5	10
K_{TG} [Vs]			

Tablica 3.

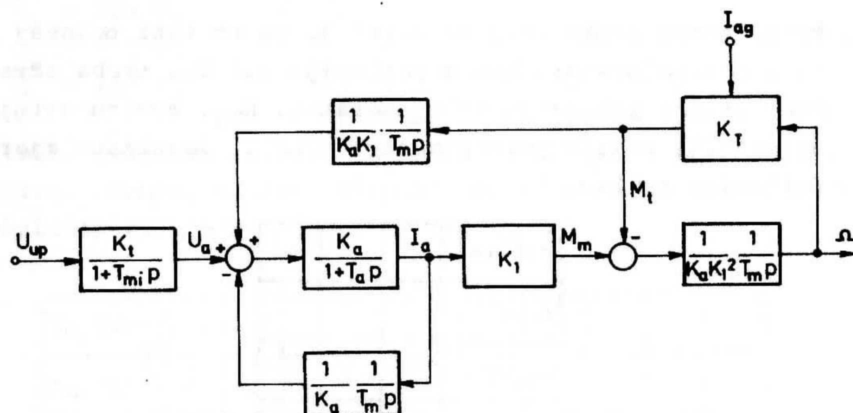
8. Priključiti se sondom osciloskopa na mjernu točku T_7 mudula EALA 211. Mijenjati opterećenje motora promjenom položaja preklopke b6 i potenciometra r_{14}. Rezultate mjerenja unijeti u tablicu 4. i izračunati koeficijent pojačanja K_i povratne veze armaturne struje. U_i je mjereni napon u mjernoj točki T_7.

I_a [A]	1	1,2	1,4		2	2		
U_i [V]	0,5	0,6	0,7		~~1,3~~ 2			
K_i [V/A]								
	DISKONTINUIRANA STRUJA				KONTINUIRANA STRUJA			

Tablica 4.

2.1.4. UTJECAJ OPTEREĆENJA MOTORA NA PROMJENU BRZINE VRTNJE

Blok shemu sa slike 1.7. moguće je transformirati i prikazati je kao na slici 4.



Slika 4. Transformirana blok shema motora terećenog generatorom

Kao što je vidljivo sa slike 4. promjena opterećenja generatora djeluje na dva mjesta. Parametar K_T treba promatrati kao "izvana upravljivi parametar". Njegova veličina se može mijenjati promjenom uzbudne struje generatora (pomoću potenciometra r_{14} na maketi) ili promjenom otpora R_t u krugu armature (pomoću višepoložajne preklopke b6).

ZADATAK

9. Uz α=konst. mijenjati opterećenje motora od minimalnog do maksimalnog iznosa. Rezultat mjerenja unijeti u tablicu 5. Na osnovi mjerenja nacrtati vanjsku karakteristiku ispravljača.

140 148 150 160 180

U_a [V]	131	140	140					
I_a [A]	~~0,91~~ 1,8	1,6	1					

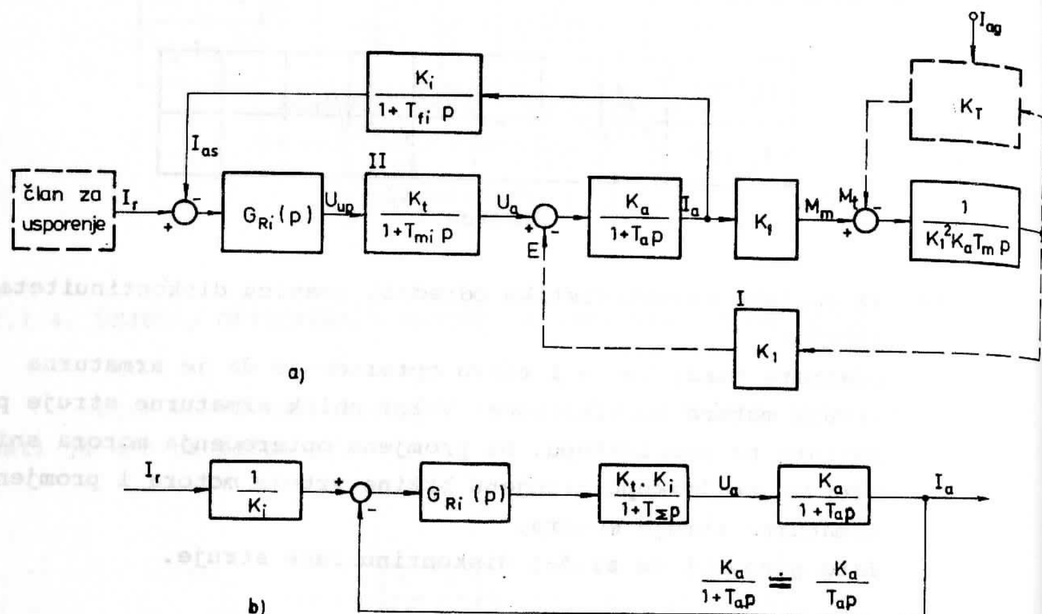
1,98 1,7 1,5 1,3 0,8

Tablica 5.

10. Iz vanjske karakteristike odrediti granicu diskontinuiteta struje.
11. Odabrati takav kut α i takvo opterećenje da je armaturna struja motora kontinuirana. Valni oblik armaturne struje promatrati na osciloskopu. Uz promjenu opterećenja motora snimiti na osciloskopu promjenu brzine vrtnje motora i promjenu armaturne struje motora.
    Isto ponoviti za slučaj diskontinuirane struje.
12. Komentirati razlike s obzirom na brzinu odziva brzine vrtnje motora.

VJEŽBA 2.2: ANALIZA I SINTEZA REGULACIJSKE PETLJE ARMATURNE STRUJE MOTORA

Blokovska shema petlje armaturne struje dana je na slici 5.



Slika 5. Blokovska shema regulacijske petlje armaturne struje a) i njena aproksimacija b)

Regulacijska petlja struje (II) znatno je brža od petlje elektromotorne sile E(I), jer se E može mijenjati relativno sporo i ograničeno zbog zamašnih masa pogona. Zbog tih razloga je regulator struje moguće podešavati u pogonskim uvjetima u mirujućem stanju motora (odspojena uzbuda i motor zakočen). Prema tome je prijenosna funkcija otvorene petlje armaturne struje motora:

$$G_{oi}(p) = \frac{I_{as}(p)}{I_r(p)} = G_{Ri}(p)\ \frac{K_a}{1+T_a p}\ \frac{K_t}{1+T_{mi} p}\ \frac{K_i}{1+T_{fi} p} \qquad (1)$$

Da bi se potpuno iskompenzirao utjecaj smetnji, koje djeluje na regulacijsku petlju armaturne struje, potrebno je da pripadni regulator ima komponentu s integralnim djelovanjem. Pošto se želi ostvariti i dovoljna brzina regulacijske petlje, koristi se regulator s PI djelovanjem:

$$G_{Ri}(p) = K_{R2}\ (1 + \frac{1}{T_{I2} p}) = K_{R2}\ \frac{1+T_{I2} p}{T_{I2} p}\ . \qquad (2)$$

Za armaturnu vremensku konstantu T_a, uz uobičajene parametre sistema, vrijedi:

$$T_a \gg T_{mi} + T_{fi}, \qquad (3)$$

odnosno, T_a je dominantna vremenska konstanta petlje armaturne struje. Na osnovi relacije (3) može se član $Ka/1+T_a p$, dinamički gledano, aproksimirati integralnim članom, tj:

$$\frac{K_a}{1+T_a p} \doteq \frac{K_a}{T_a p}\ . \qquad (4)$$

Aproksimacija (4) se općenito može primijeniti ako je $T_a \geq 4(T_{mi} + T_{fi})$. U tom slučaju prijenosna funkcija (1) poprima oblik:

$$G_{oi}(p) = \frac{K_{R2}\ K'_{oi}}{T_{I2}\ T_a p^2} \cdot \frac{1+T_{I2} p}{1+T_\Sigma\ p}\ , \qquad (5)$$

gdje je:

$$T_\Sigma = T_{fi} + T_{mi},$$

$$K'_{oi} = K_a K_t K_i.$$

Na osnovi relacije (5) nacrtana je aproksimativna blokovska shema (slika 5b) regulacijske petlje armaturne struje uz zanemaren derivacijski utjecaj vremenske konstante T_{fi}.

Sistem koji je opisan prijenosnom funkcijom (5) je stabilan samo za $T_{I2} > T_\Sigma$; u protivnom je fazno-frekvencijska karakteristika $\phi < -\Pi$.

Bodeov prikaz amplitudno-frekvencijske karakteristike i fazno-frekvencijske karakteristike drugog člana u izrazu (5):

$$G_2(j\omega) = \frac{1+j\omega T_{I2}p}{1+j\omega T_{\Sigma}p} = |G_2|e^{j\phi_2} \qquad (6)$$

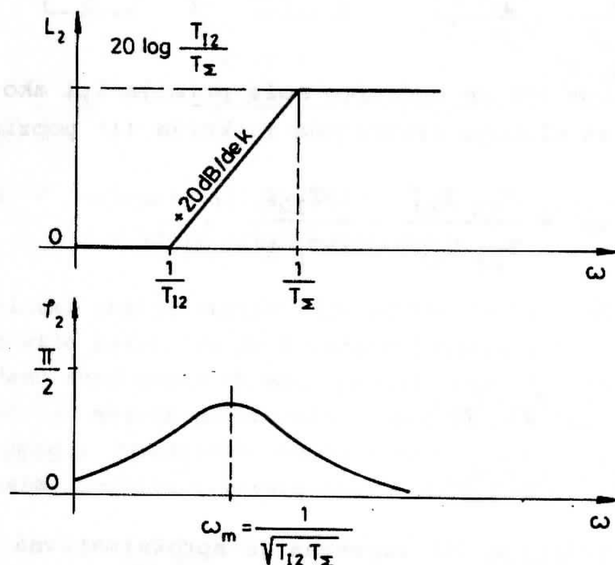
izgleda kao na slici 6.

Maksimum fazno-frekvencijske karakteristike je kod frekvencije:

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{T_{I2}T_{\Sigma}}} \qquad (7)$$

i iznosi:

$$\phi_{2m} = \text{arctg}\sqrt{\frac{T_{I2}}{T_{\Sigma}}} \qquad (8)$$



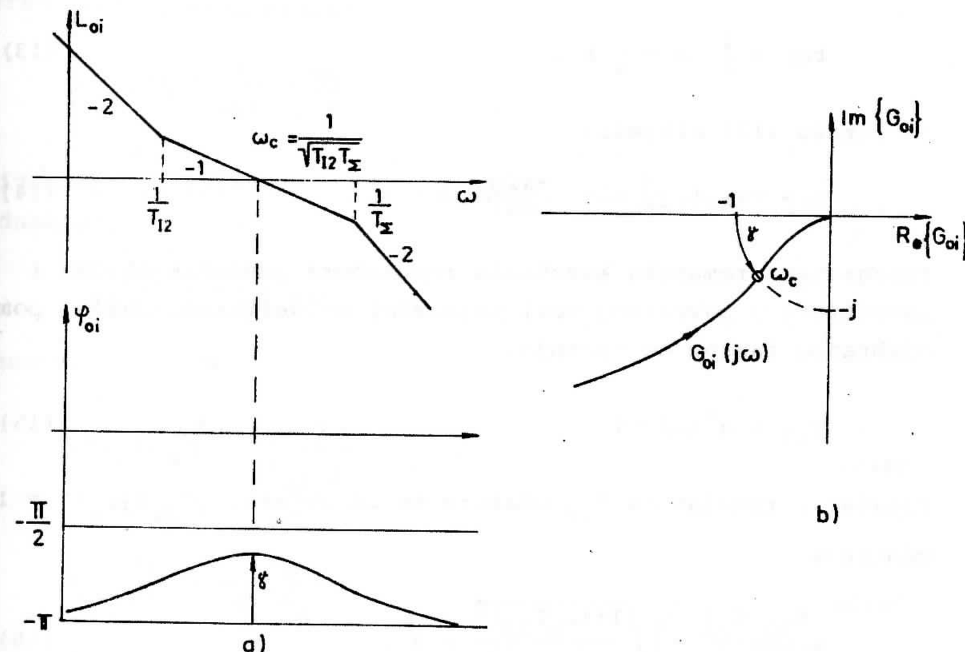
Slika 6. Amplitudno i fazno-frekvencijska karakteristika PDT člana

Izabere li se frekvencija presjeka $G_{oi}(p)$ tako da bude jednaka ω_m $(\omega_c=\omega_m)$, tj. ako je: $|G_{oi}(j\omega_m)| = 1$, fazno osiguranje ima maksimalno moguću vrijednost. Pošto je $\phi_{oi} = \phi_2 - \Pi$, tada za fazno osiguranje vrijedi izraz:

$$\gamma = \phi_{oi}(\omega_c) + \Pi = \phi_2(\omega_m). \qquad (9)$$

Kod maksimalnog faznog osiguranja moraju se očekivati maksimalni uvjeti prigušenja.

Slika 7. prikazuje Bodeov i polarni dijagram frekvencijske karakteristike petlje armaturne struje za ovaj izbor parametara.



Slika 7. Bodeov a) i polarni b) dijagram frekvencijske karakteristike petlje armaturne struje

Amplitudno i fazno-frekvencijska karakteristika, kao što je vidljivo sa slike 7, su simetrične u odnosu na frekvenciju presjeka. Iako se radi o sistemu trećeg reda, moguće je analitički odrediti slobodne parametre (parametre regulatora), zahvaljujući upravo tom svojstvu simetričnosti.

Pretpostavimo da je:

$$T_{I2} = a^2 T_{\Sigma} \;,$$

gdje je:

a - konstanta koju treba odrediti.

U tom slučaju je frekvencija presjeka na osnovi izraza (7):

$$\omega_c = \frac{1}{aT_\Sigma} , \qquad (11)$$

odnosno, fazno osiguranje:

$$\gamma = \text{arctg } a - \text{arctg } \frac{1}{a} , \qquad (12)$$

ili:

$$tg\gamma = \frac{1}{2} \left(a - \frac{1}{a}\right) . \qquad (13)$$

Iz izraza (13) slijedi:

$$a = tg\gamma + \frac{1}{\cos\gamma} = \frac{1+\sin}{\cos\gamma} \qquad (14)$$

Integralna vremenska konstanta regulatora (umnožak otpora i kapaciteta u povratnoj vezi pojačala) se definira, dakle, pomoću odabranog faznog osiguranja:

$$T_{I2} = a^2(\gamma) \cdot T_\Sigma . \qquad (15)$$

Pojačanje regulatora K_{R2} odabire se iz uvjeta: $|G_{oi}(j\omega_c)| = 1$, odnosno:

$$\frac{K_{R2}\, K'_{oi}}{T_{I2} T_a \omega_c^2} \cdot \sqrt{\frac{1+(\omega_c T_{I2})^2}{1+(\omega_c T_\Sigma)^2}} = 1 . \qquad (16)$$

Iz relacije (16) slijedi jednostavan rezultat:

$$K_{R2} = \frac{1}{K'_{oi}} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{T_a}{T_\Sigma} . \qquad (17)$$

Fazno osiguranje se smanjuje prilikom povećanja ili smanjenja pojačanja zbog oblika fazno-frekvencijske karakteristike. U oba slučaja slabi prigušenje.

Uvrsti li se vrijednost izračunatog pojačanja, prema izrazu (17), u izraz za prijenosnu funkciju otvorene petlje (5), dobiva se:

$$G_{oi}(p) = \frac{1}{a^3(T_\Sigma\, p)^2} \; \frac{1+a^2T_\Sigma p}{1+T_\Sigma p} , \qquad (18)$$

Poslije uvodjenja supstitucije:

$$aT_\Sigma p = \frac{p}{\omega_c} = q , \qquad (19)$$

izraz (18) poprima oblik:

$$G_{oi}(q) = \frac{1}{aq^2} \; \frac{1+aq}{1+\frac{q}{a}} . \qquad (20)$$

Prijenosna funkcija (20) ima svojstva simetričnosti, tj. vrijedi jednakost:

$$G_{oi}\left(\frac{1}{q}\right) = \frac{1}{G_{oi}(q)} , \qquad (21)$$

odnosno:

$$|G_{oi}(j\frac{\omega_c}{\omega})| = \frac{1}{|G_{oi}(j\frac{\omega}{\omega_c})|} , \qquad (21a)$$

$$\phi_{oi}\left(\frac{\omega_c}{\omega}\right) = \phi_{oi}\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) , \qquad (21a)$$

što je vidljivo i iz slike 7.

Prijenosna funkcija zatvorene petlje armaturne struje (slika 5.b) je:

$$\frac{I_a(q)}{I_r(q)} = G_i(q) = \frac{1}{K_i} \; \frac{G_{oi}}{1+G_{oi}} = \frac{1}{K_i} \; \frac{1+aq}{1+aq+aq^2+aq^3} \qquad (22)$$

Pošto su linearni članovi brojnika i nazivnika prijenosne funkcije (22) medjusobno jednaki, integral pogreške je jednak nuli. To je posljedica dvostrukog pola u p=o prijenosne funkcije otvorene petlje $G_{oi}(p)$.

Polovi prijenosne funkcije zatvorene petlje $G_i(q)$, tj. vlastite vrijednosti promatranog sistema dadu se, u ovom specijalnom slučaju eksplicitno izračunati. Vrijedi naime:

$$q^3+aq^2+aq+1 = (q+1)\,[q^2+(a-1)q+1]\,.$$

Polovi prijenosne funkcije $G_i(q)$ (slika 8.) su:

$$q_1 = -1,$$

$$q_{2,3} = -\frac{a-1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a-1}{2}\right)^2 - 1}\,. \qquad (23$$

Za $a \geqslant 3$ je $q_3 = \frac{1}{q_2}$.

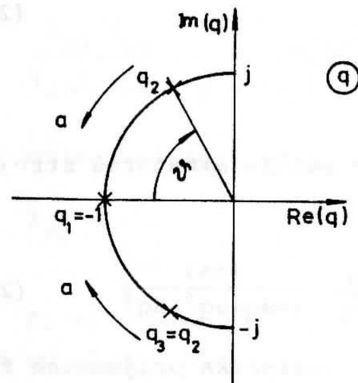
Za $1 < a < 3$ vrijedi izraz:

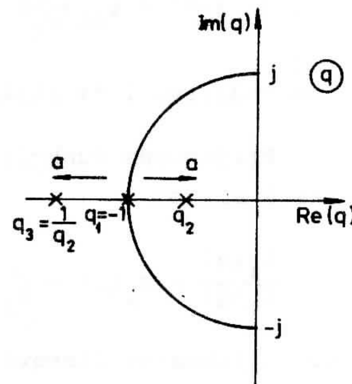
$$q_{2,3} = -\frac{a-1}{2} \pm j\sqrt{1-\left(\frac{a-1}{2}\right)^2} = e^{\pm j(\Pi - \psi)}\,, \qquad (23a)$$

gdje je:

$$\psi = \arccos\zeta = \arccos\frac{a-1}{2}\,.$$

U velikom broju slučajeva iz prakse preporučava se podesiti regulacijsku petlju armaturne struje tako da relativni faktor prigušenja iznosi $\zeta = \frac{1}{2}$, čemu odgovara a=2.





Slika 8. Kompleksne a) i realne b) vlastite vrijednosti sistema

Integralna vremenska konstanta i pojačanje regulatora za relativni faktor prigušenja sistema $\zeta = \frac{1}{2}$ su prema relacijama (11) i (17):

$$T_{I2} = 4\,T_\Sigma\,,$$

$$K_{R2} = \frac{1}{K_a K_i K_t}\,\frac{T_a}{\sqrt{T_{I2}T_\Sigma}} = \frac{1}{K_a K_i K_t}\cdot\frac{T_a}{2T_\Sigma}\,. \qquad (24)$$

Na slici 9. prikazani su odzivi (prijelazne funkcije) na skokovitu promjenu upravljačke veličine I_r regulacijske petlje armaturne struje za razne odnose T_a/T_Σ. Pri tome su parametri regulatora armaturne struje podešeni prema relacijama (24).

Ako je $T_a \geqslant 20T_\Sigma$, aproksimacija (4) utječe na fazno osiguranje manje od 5,6%, odnosno na nadvišenje u odzivu manje od 5% (slika 9.). Ako je $T_a < 20T_\Sigma$, tada je utjecaj aproksimacije (4) na fazno osiguranje, a time i na nadvišenje u odzivu, znatniji.

Za $T_a > 20T_\Sigma$, te za a=2 i $T_{I2}=4T_\Sigma$ je $\gamma \doteq 30^\circ$ i $\sigma_m \doteq 40\%$ (sl.9.).

Za $T_a=5T_\Sigma$, te za a=2 i $T_{I2}=4T_\Sigma$ je $\gamma \doteq 60^\circ$ i $\sigma_m \doteq 10\%$ (sl.9.).

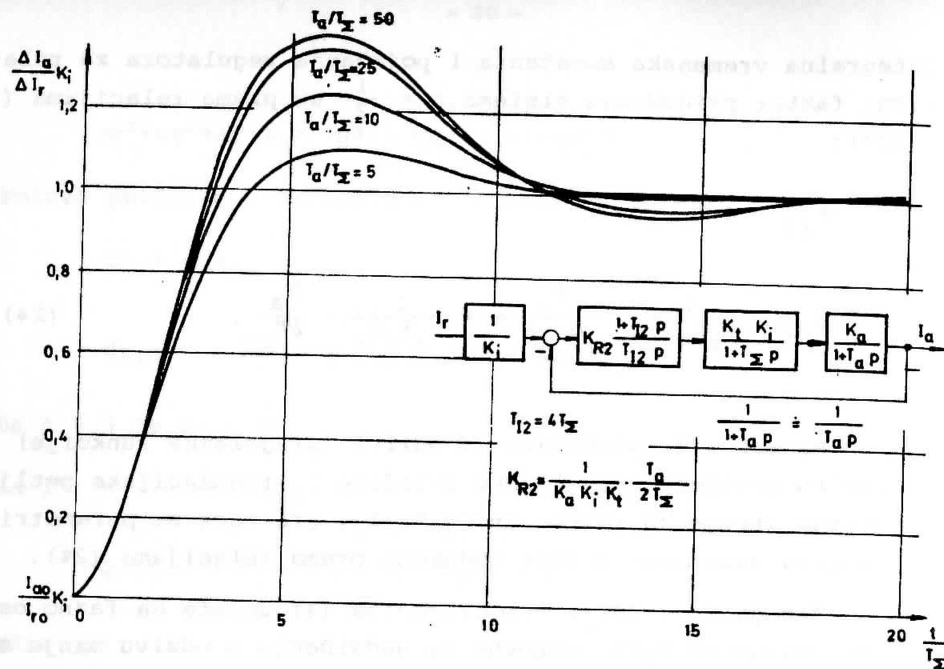
Ovi rezultati slijede iz približne relacije:

$$\sigma_m[\%] \doteq 70 - \gamma[^\circ]\,. \qquad (25)$$

Iz izloženog je vidljivo da dinamika regulacijskog sistema jako ovisi o odnosu T_a/T_Σ.

Nameće se sada ideja da se ostvari frekvencijska karakteristika zatvorenog sistema koja bi bila neovisna o odnosu T_a/T_Σ, te koja bi se podudarala s frekvencijskom karakteristikom regulacijskog sistema s integralnim članom u objektu regulacije. Iz relacije (12) slijedi da je fazno osiguranje sistema, čiji objekt regulacije ima integralni član: $\gamma=37^\circ$, pod uvjetom da su parametri regulatora odabrani prema relacijama (24), odnosno fazni pomak iznosi:

$$\phi_o(\omega_c) = \gamma - \Pi = -143^\circ\,. \qquad (26)$$



Slika 9. Odzivi na skokovitu promjenu upravljačke veličine regulacijske petlje armaturne struje s parametrima regulatora podešenim prema izrazima (24)

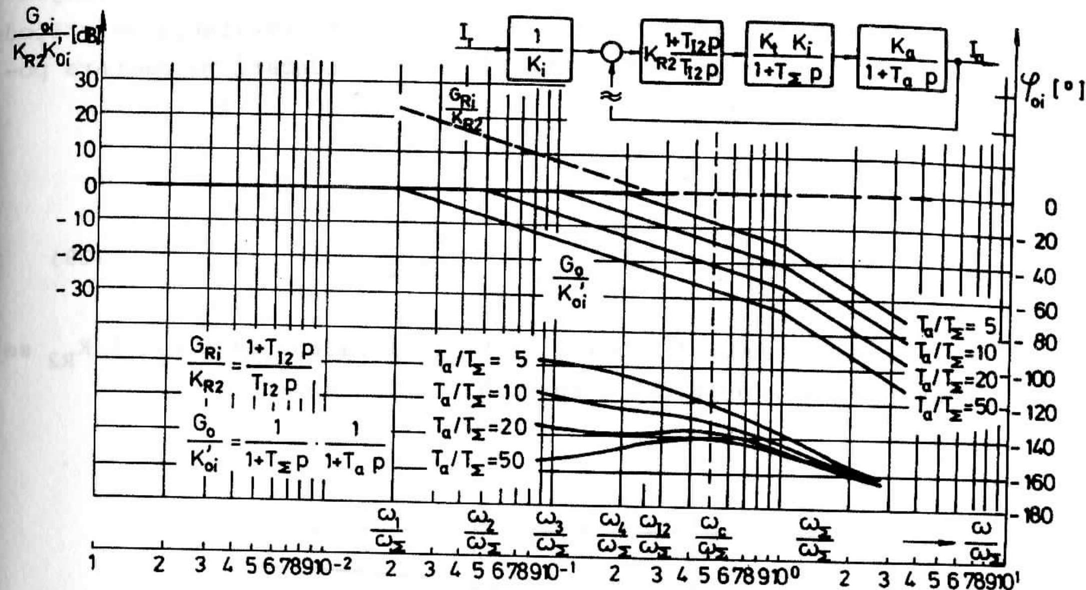
Postavlja se dakle zadatak da se odaberu takvi parametri regulatora da fazno osiguranje bude 37^{o}, neovisno o odnosu T_a/T_Σ. Da bi se to ostvarilo, moraju se odabrati takve vrijednosti K_{R2} i T_{I2} da bude zadovoljen uvjet:

$$\omega_c = \sqrt{\omega_{I2}\omega_\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{T_{I2}T_\Sigma}} \qquad (27)$$

Iz relacije (27) odredjuje se frekvencija presjeka ω_c ovisno o iznosu integralne vremenske konstante regulatora T_{I2}.

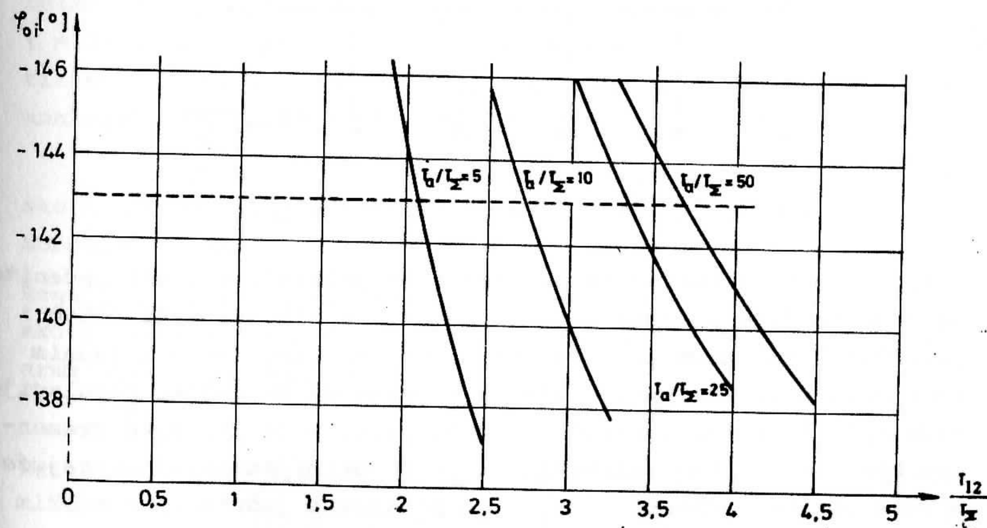
Iz frekvencijske karakteristike petlje armaturne struje (slika 10.) dobije se fazni pomak:

$$\phi_{oi}(\omega) = -\left(\mathrm{arctg}\frac{1}{\omega_c T_{I2}} + \mathrm{arctg}\,\omega_c T_\Sigma + \mathrm{arctg}\,\omega_c T_a\right). \qquad (28)$$



Slika 10. Frekvencijska karakteristika s parametrima regulatora odredjenim prema (24)

Na slici 11. nanešen je fazni pomak ϕ_{oi} kao funkcija T_{I2}/T_Σ s parametrom T_a/T_Σ. Za fazni kut $\phi_{oi} = -143^{o}$ dobiva se dijagram dat na slici 12.



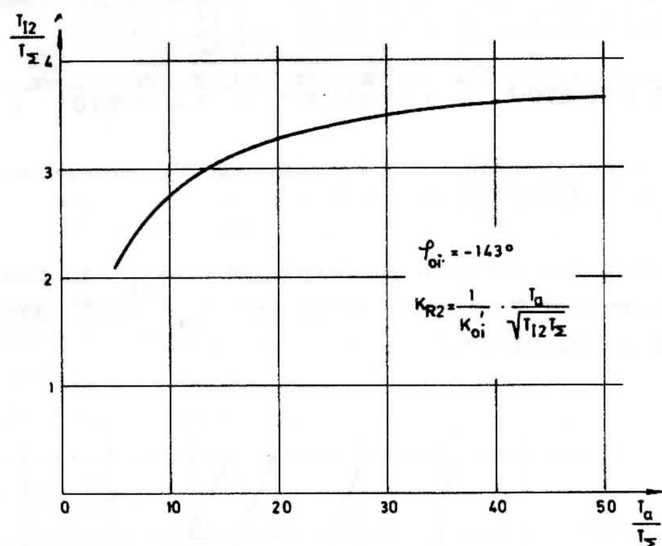
Slika 11. Fazni kut kao funkcija T_{I2}/T_Σ

Iz dijagrama danog na slici 12. je vidljivo da se vrijednosti parametara regulatora armaturne struje razlikuju od vrijednosti prema relaciji (24). Korigirane vrijednosti parametara poprimaju sada oblik:

$$T_{I2} = k_1 \, 4T_\Sigma \, ,$$

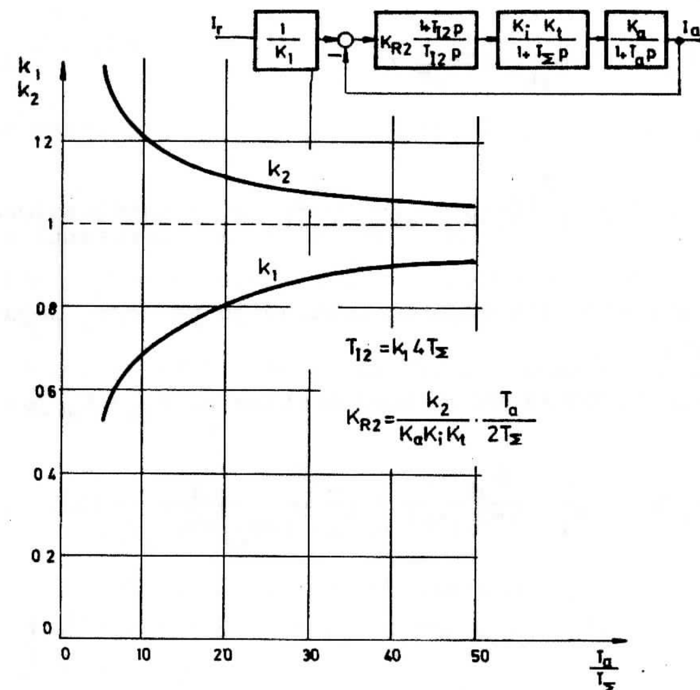
$$K_{R2} = \frac{k_2}{K_a K_i K_t} \, \frac{T_a}{2T_\Sigma} \, . \qquad (29)$$

Korekcijski faktori k_1 i k_2 za izračunavanje T_{I2} i K_{R2} se mogu prikazati grafički u funkciji T_a/T_Σ (slika 13.).



Slika 12. Funkcionalna ovisnost T_{I2} o T_Σ

Izložena metoda računanja parametara regulatora vrijedi općenito za regulacijske sisteme čiji se objekt regulacije (uključivo i postavni član) dade predstaviti s jednim integralnim i jednim aperiodskim članom prvog reda. U slučaju da se objekt regulacije dade opisati s dva aperiodska člana prvog reda, čije se vremenske konstante bitno razlikuju, mogu se primijeniti odgovarajuće aproksimacije i objekt regulacije prikazati jednim aperiodskim i jednim integralnim članom.



Slika 13. Korekcijski faktori relacije (29)

Relacije (24), odnosno (29) proizašle su iz postavke da je faktor relativnog prigušenja $\zeta = \frac{1}{2}$, odnosno da je fazno osiguranje $\gamma = 37^\circ$. Za druge vrijednosti relativnog faktora prigušenja, diktirane tehnološkim zahtjevima, dobile bi se analogne relacije i analogni dijagrami.

U dosadašnjem izlaganju smo odabirali integralnu vremensku konstantu regulatora s obzirom na iznos sume malih vremenskih konstanti kruga.

Regulacijski krug, dinamički gledano, poprima drugačija svojstva ako se integralnom vremenskom konstantom T_{I2} nastoji kompenzirati armaturna vremenska konstanta T_a, tj.

$$T_{I2} = T_a .$$

Prijenosna funkcija otvorenog sistema (1) u tom slučaju glasi:

$$G_{oi}(p) = K_{R2} \, \frac{1}{T_{I2}p} \, \frac{K_t K_i K_a}{1 + T_\Sigma p} \, , \qquad (30)$$

odnosno:

$$G_{oi}(p) = \frac{1}{T_{ik}p} \cdot \frac{1}{1+T_\Sigma p}\,, \tag{31}$$

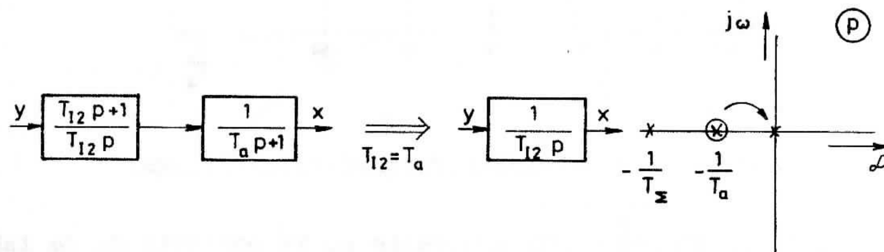
gdje je:

$T_{ik} = \dfrac{T_{I2}}{K_{R2}K_t\,K_i\,K_a} = \dfrac{T_a}{K_{R2}\,K_t\,K_i\,K_a}$ - integraciona vremenska konstanta cijelog kruga.

Time se umjesto pola objekta regulacije $p= -1/T_a$ pojavljuje pol $p=o$ (slika 14.).

Prijenosna funkcija zatvorenog sistema uz $T_{I2} = T_a$ je:

$$G_i(p) = \frac{1}{K_i}\,\frac{G_{oi}(p)}{1+G_{oi}(p)} = \frac{1}{K_i}\,\frac{1}{1+T_{ik}p+T_{ik}T_\Sigma p^2}\,. \tag{32}$$



Slika 14. Kompenzacija dominantne vremenske konstante

Neprigušena prirodna frekvencija sistema je:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{T_{ik}T_\Sigma}}\,, \tag{33}$$

a relativni faktor prigušenja sistema:

$$\zeta = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_{ik}}{T_\Sigma}}\,. \tag{34}$$

Iz relacije (34) dobiva se:

$$T_{ik} = 4\,\zeta^2 T_\Sigma\,. \tag{35}$$

Uvrštenjem relacije (35) u (33) dobiva se:

$$\omega_n = \frac{1}{2\zeta T_\Sigma}\,. \tag{33a}$$

Regulacijski sistem je utoliko brži ukoliko je manja vremenska konstanta T_Σ.

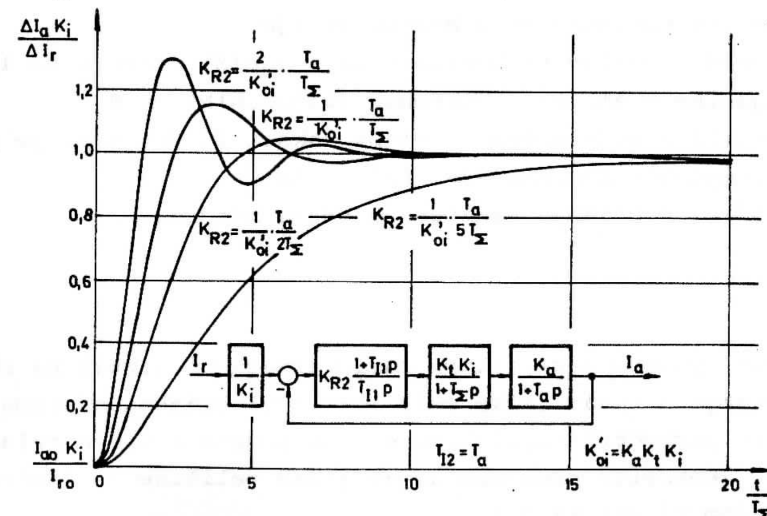
Iz relacije (35) dade se izlučiti faktor pojačanja regulatora armaturne struje:

$$K_{R2} = \frac{1}{4\zeta^2}\cdot\frac{1}{K_i K_t K_a}\cdot\frac{T_{I2}}{T_\Sigma}\,;\quad T_{I2}=T_a \tag{36}$$

Na slici 15. dani su odzivi armaturne struje na skokovitu promjenu upravljačke veličine I_r za razne vrijednosti faktora pojačanja K_{R2} uz $T_{I2}=T_a$.

Želi li se ostvariti prijelazni proces uz skokovitu promjenu upravljačke veličine I_r, takav da nadvišenje bude $\sigma_m \leq 5\%$, onda iz relacije (budući se radi o sistemu drugog reda):

$$\sigma_m[\%] = 100\,e^{-\frac{\Pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \tag{37}$$



Slika 15. Odzivi armaturne struje na skokovitu promjenu upravljačke veličine I_r

slijedi da je $\zeta \geq 1/\sqrt{2}$), odnosno pojačanje regulatora armaturne struje:

$$K_{R2} = \frac{1}{K_i K_t K_a} \frac{Ta}{2T_\Sigma} \quad . \qquad (38)$$

2.2.1. PRIPREME ZA VJEŽBU

1. Odrediti iznos faznog osiguranja γ sistema regulacije armaturne struje uz podešenje regulatora prema relacijama (24), te iz toga izračunati približnu vrijednost maksimalnog nadvišenja σ_m.

   Napomena: $T_{fi} = 2ms$.

2. Provesti isti postupak kao u zadatku 1 uz podešenje regulatora prema relacijama (36) za:

   a) $\zeta = 0,5$,

   b) $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

2.2.2. UPUTE ZA VJEŽBU

1. Odspojiti povratnu vezu brzine vrtnje.
2. Pojačanje regulatora brzine vrtnje (GAIN) staviti na 1, a integralnu vremensku konstantu (TIME/GAIN) na 0.
3. Odspojiti uzbudu motora i motor zakočiti. Pri tome je potrebno prespojiti kontakte 4-7 releja d2.
4. Uključiti napajanje armaturnog kruga motora.

ZADATAK

1. Snimiti pomoću osciloskopa odziv armaturne struje na skokovitu promjenu upravljačke veličine regulacijskog sistema struje, ako su parametri regulatora struje podešeni prema relacijama (24). Skokovitu promjenu upravljačke veličine realizirati tipkalom T1 (slika 3.).

2. Ponoviti snimanja provedena u zadatku 1 uz podešenje regulatora struje prema relacijama (29).
3. Ponoviti snimanja provedena u zadatku 1 za dvostruko veću i dvostruko manju integralnu vremensku konstantu T_{I2} regulatora struje.
4. Komentirajte prijelazne procese dobivene u zadacima 1, 2 i 3.
5. Snimiti odziv armaturne struje na skokovitu promjenu upravljačke veličine regulacijskog sistema struje, ako su parametri regulatora struje podešeni prema relacijama (36) i to za:

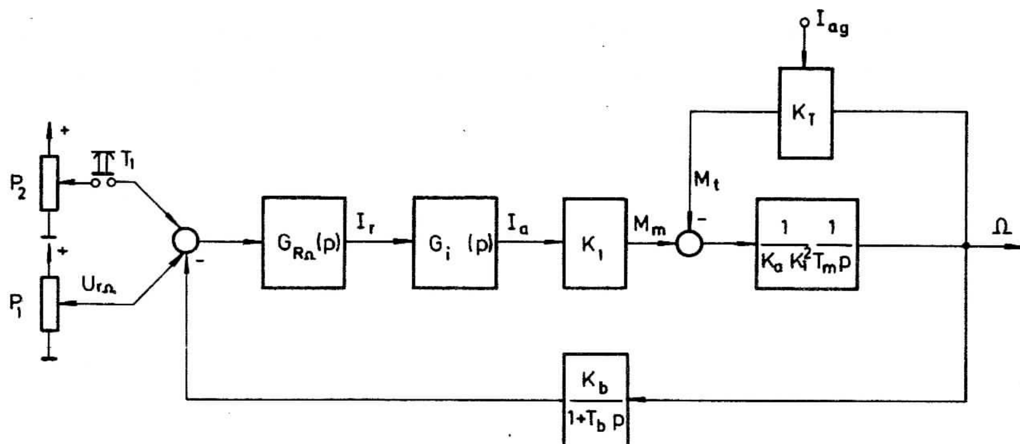
   a) $\zeta = 0,5$

   b) $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

6. Komentirajte prijelazne procese dobivene u zadatku 5, te ih usporedite s prijelaznim procesima iz zadataka 1, 2 i 3.

VJEŽBA 2.3: ANALIZA I SINTEZA SISTEMA S PROPORCIONALNIM REGULATOROM BRZINE VRTNJE

Budući petlja elektromotorne sile **E** ima znatno nižu graničnu frekvenciju od regulacijske petlje armaturne struje, može se utjecaj elektromotorne sile E (poremećajne veličine petlje struje) zanemariti prilikom razmatranja dinamičkih svojstava petlje armaturne struje. Na taj način se dobiva jednostavna struktura regulacijskog sistema brzine vrtnje (slika 16.), gdje blok s oznakom $G_i(p)$ predstavlja zatvoreni regulacijski sistem armaturne struje.



Slika 16. Blokovski prikaz regulacijskog sistema brzine vrtnje

Za stabilizaciju nadredjenog regulacijskog sistema brzine vrtnje dovoljno je aproksimativno opisati dinamičko ponašanje regulacijskog sistema armaturne struje. Podesi li se regulator armaturne struje tako da je odziv struje I_a na skokovitu promjenu upravljačke veličine I_r približno aperiodski (npr. $\zeta = 1/\sqrt{2}$, tada se iz vremenskog porasta t_1 struje I_a odredjuje aproksimativno dinamičko ponašanje regulacijskog sistema armaturne struje:

$$t_1 \doteq 2,5\ T_s,$$

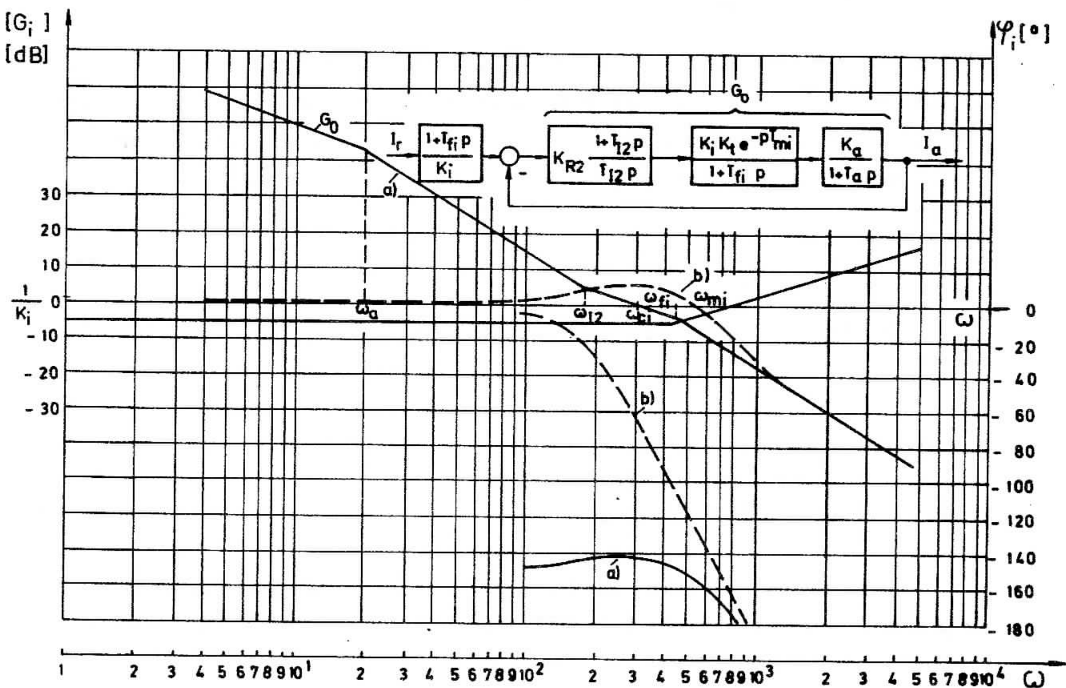
odnosno:

$$T_s \doteq \frac{t_1}{2,5} \; , \qquad (39)$$

gdje je:

t_1 – vrijeme porasta definirano kao vrijeme potrebno da regulirana veličina dosegne prvi put novu stacionarnu vrijednost nakon djelovanja pobude,

T_s – nadomjesna vremenska konstanta regulacijskog sistema struje.



Slika 17. Frekvencijska karakteristika otvorenog a) i zatvorenog b) regulacijskog sistema armaturne struje

Ako je ovaj način odredjivanja nadomjesne vremenske konstante T_s neprikladan iz bilo kojih razloga, moguće ju je dobiti i iz frekvencijske karakteristike sistema. Na osnovi parametara regulacijskog sistema struje nacrta se njegova amplitudno i fazno frekvencijska karakteristika otvorenog sistema (slika 17.a), te se iz frekvencije sjecišta ω_{ci} odredi nadomjesna vremenska konstanta:

$$T_s \doteq \frac{1}{\omega_{ci}} . \qquad (40)$$

Koristeći se Nicholaovim dijagramom moguće je dobiti iz frekvencijske karakteristike otvorenog sistema njemu pripadnu frekvencijsku karakteristiku zatvorenog sistema (slika 17.b). Iz slike 17. je vidljivo da je kod nižih frekvencija iznos amplitudno frekvencijske karakteristike jako velik, tj. $|G_o| \gg 1$, te vrijedi aproksimacija za zatvoreni sistem s jediničnom povratnom vezom:

$$|G| = \frac{|G_o|}{1+|G_o|} \doteq \frac{|G_o|}{|G_o|} = 1. \qquad (41)$$

Kako je u seriju sa zatvorenim sistemom s jediničnom povratnom vezom spojen inverzni član povratne veze, dobiva se za zatvoreni regulacijski sistem struje amplitudno frekvencijska karakteristika kod nižih frekvencija:

$$|G_i| \doteq \frac{1}{K_i} . \qquad (41a)$$

Za više frekvencija vrijedi aproksimacija:

$$|G| \doteq |G_o|, \qquad (42)$$

odnosno,

$$|G_i| \doteq |G_o| \cdot \frac{|1+T_{fi}j\omega|}{K_i} . \qquad (42a)$$

Pored navedenih dviju mogućnosti za odredjivanje nadomjesne vremenske konstante T_s regulacijskog sistema armaturne struje, može se ista računati po aproksimativnoj relaciji:

$$T_s \doteq \frac{T_\Sigma}{2} k_2 , \qquad (43)$$

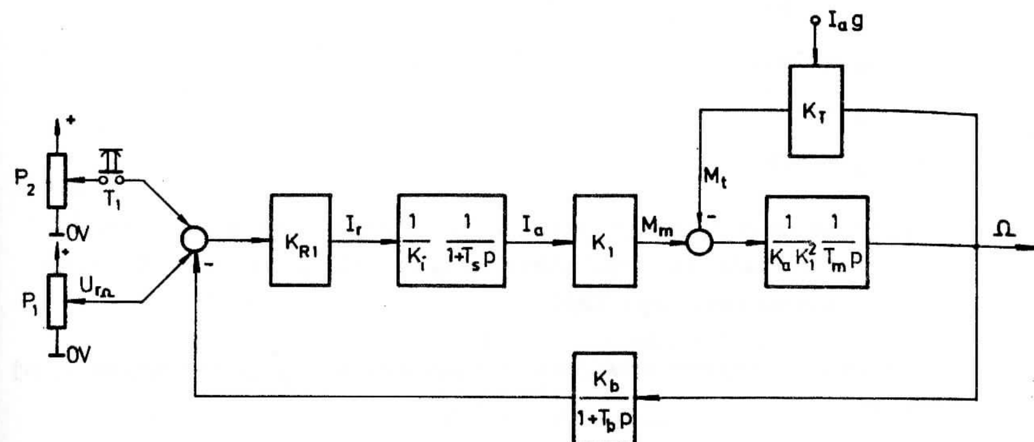
gdje je:

$T_\Sigma = T_{mi} + T_{fi}$,

k_2 - korekcijski faktor prema dijagramu iz slike 13.

Ako postoji filter u grani upravljačke veličine I_r, nadomjesna vremenska konstanta računata po formuli (43) treba se uvećati za iznos njegove vremenske konstante.

Kompletan aproksimativni regulacijski sistem brzine vrtnje uz regulator brzine proporcionalnog djelovanja prikazan je na slici 18.



Slika 18. Blokovski prikaz regulacijskog sistema brzine vrtnje motora s regulatorom proporcionalnog djelovanja

2.3.1. PRIPREME ZA VJEŽBU

1. Na osnovi slike 3. izračunati faktor pojačanja K_b grane povratne veze brzine vrtnje.
   Uputa: Za nominalnu brzinu vrtnje, napon u ispitnoj točci T_{17} (slika 3.) treba iznositi oko 10 V.
   Koliki je pri tome faktor naponskog prilagodjenja k_{pb} signala tahogeneratora?

2. Iz Bodeovog prikaza frekvencijske karakteristike otvorenog sistema regulacije armaturne struje odrediti njegovu nadomjesnu vremensku konstantu T_s. Parametre regulatora struje odabrati prema izrazima (36) uz relativni faktor prigušenja $\zeta = 0,7$. Utjecaj djelovanja povratne veze protuelektromotorne sile **E** zanemariti.

3. Iz Bodeovog prikaza frekvencijske karakteristike otvorenog sistema regulacije brzine vrtnje odrediti pojačanje K_{R1} regulatora brzine vrtnje tako da nadvišenje iznosi:

a) $\sigma_m = 0\%$,

b) $\sigma_m = 10\%$,

c) $\sigma_m = 20\%$,

d) $\sigma_m = 30\%$,

e) $\sigma_m = 40\%$,

f) $\sigma_m = 50\%$.

Uputa: Za odredjivanje ukupnog pojačanja otvorenog sistema i pojačanja regulatora brzine vrtnje koristiti približnu relaciju (25).

4. Izračunati vrijeme prvog maksimuma odziva t_m prema približnoj relaciji:

$$t_m \doteq \frac{3}{\omega_c}, \qquad (44)$$

gdje je:

ω_c - frekvencija sjecišta amplitudno frekvencijske karakteristike otvorenog sistema regulacije brzine vrtnje.

5. Izračunati statičku pogrešku s obzirom na upravljačku veličinu δ_{us} sistema regulacije brzine vrtnje s proporcionalnim regulatorom, koristeći relaciju:

$$\delta_{us}\,[\%] = \frac{100}{1+K_o} \doteq \frac{100}{K_o}, \qquad (45)$$

gdje je:

K_o - pojačanje otvorenog sistema regulacije brzine vrtnje.

2.3.2. UPUTE ZA VJEŽBU

1. Parametre regulatora armaturne struje podesiti prema relacijama (36) uz $\zeta \doteq 0,7$.

2. Zatvoriti povratnu vezu po brzini vrtnje (preklopka PB).

3. Preklopku TIME/GAIN (VRIJEME/POJAČANJE) regulatora brzine vrtnje postaviti na nulu.

4. Preklopku GAIN (POJAČANJE) regulatora brzine vrtnje postaviti na iznos izračunat u točci 3. priprema za vježbu.

5. Uključiti napajanje armature motora.

6. Potenciometrom P_1 i preklopkom b_6 osigurati kontinuirani režim rada ispravljača.

ZADATAK

1. Snimiti na jedan kanal pisača ili osciloskopa odziv brzine vrtnje na skokovitu promjenu namještene vrijednosti brzine vrtnje. Na drugi kanal pisača ili osciloskopa snimiti skokovitu promjenu namještene vrijednosti.
Skokovitu promjenu namještene vrijednosti brzine vrtnje realizirati tipkalom T_1.

2. Iz odziva brzine vrtnje odrediti:
   a) iznos statičke pogreške brzine vrtnje δ_{us},
   b) vrijeme porasta t_1,
   c) vrijeme prvog maksimuma t_m,
   d) vrijeme trajanja prijelaznog procesa t_p.

3. Komentirati eksperimentalne rezultate i usporediti ih s rezultatima izračunatim u pripremi za vježbu.

4. Snimiti odziv brzine vrtnje i armaturne struje na skokovitu promjenu momenta tereta uz iste uvjete kao u zadatku 1.

5. Iz odziva brzine vrtnje odrediti iste veličine kao u zadatku 2.

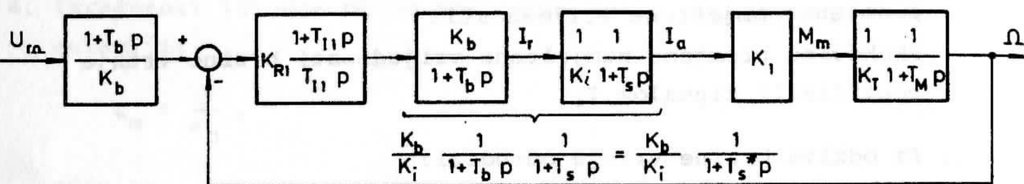
6. Komentirati rezultate i usporediti ih s rezultatima iz zadatka 2.

7. Ponoviti snimanje dato u zadatku 1 s diskontinuiranom strujom (motor bez opterećenja).

8. Komentirati utjecaj diskontinuirane struje na dinamičko ponašanje sistema.

VJEŽBA 2.4: ANALIZA I SINTEZA SISTEMA S PI REGULATOROM BRZINE VRTNJE

Blok shema aproksimativnog regulacijskog sistema brzine vrtnje svedenog na jediničnu povratnu vezu prikazana je na slici 19. Nadomjesna vremenska konstanta T_s^* sa slike 19. jednaka je sumi malih vremenskih konstanti regulacijskog sistema brzine vrtnje, tj. $T_s^* = T_s + T_b$. Opravdanost ove aproksimacije temelji se na činjenici da je elektromehanička vremenska konstanta T_m dominantna vremenska konstanta regulacijskog sistema brzine vrtnje.



Slika 19. Blokovski prikaz regulacijskog sistema brzine vrtnje s PI regulatorom

Kao što je vidljivo, regulacijski sistem prikazan na slici 19. identičan je po svojoj strukturi sistemu prikazanom na slici 5., te vrijede i sva prije izložena razmatranja. Za brzu kompenzaciju utjecaja momenata opterećenja (poremećajne veličine) preporuča se izbor parametara PI regulatora brzine vrtnje prema relacijama (46), koje su analogne relacijama (29), a koje vrijede za podešenje regulatora armaturne struje:

$$T_{I1} = k_1 \cdot 4T_s^*$$

$$K_{R1} = k_2 \cdot \frac{K_i K_T}{K_b K_1} \cdot \frac{T_M}{2T_s^*}, \qquad (45)$$

gdje je:

$T_M = \frac{K_a K_1^2}{K_T} T_m = \frac{J}{K_T}$ – elektromehanička vremenska konstanta za opterećeni motor, /s/.

Primijeni li se shodno relaciji (4) aproksimacija:

$$\frac{1}{K_T} \cdot \frac{1}{1+T_M p} \doteq \frac{1}{K_T} \frac{1}{T_M p} = \frac{1}{K_a K_1^2} \frac{1}{T_m p}, \qquad (4a)$$

tada su odzivi brzine vrtnje na skokovitu promjenu upravljačke veličine brzine vrtnje uz podešenje regulatora brzine prema relacijama:

$$T_{I1} = a^2 T_s^*, \qquad (15a)$$

$$K_{R1} = \frac{K_i K_T}{K_b K_1} \frac{T_M}{a T_s^*} = \frac{K_i K_a K_1}{K_b} \frac{T_m}{a T_s^*}, \qquad (17a)$$

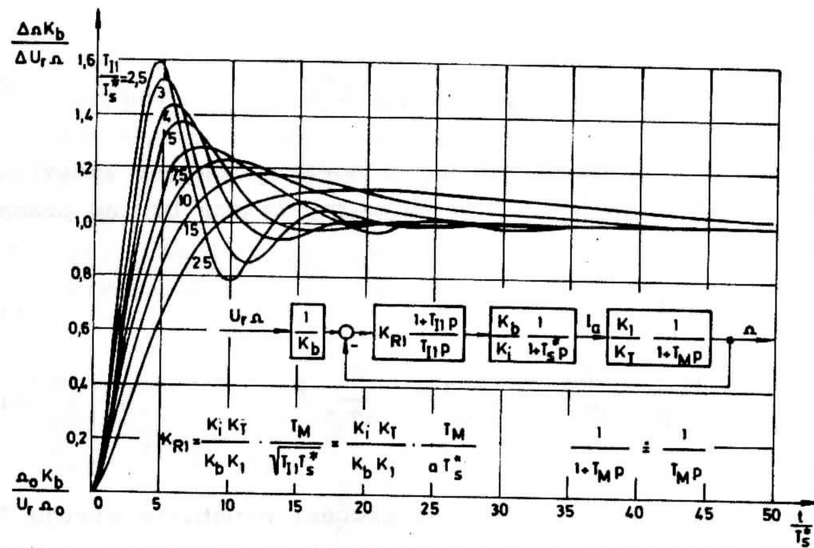
(dani na slici 20.a). Prijelazni procesi armaturne struje I_a pri tome imaju valne oblike prikazane na slici 20.b), uz pretpostavku da za vrijeme prijelaznog procesa ne nastupi diskontinuirana struja, što znači da motor mora biti jako opterećen.

Budući je moment tereta M_t u razmatranom slučaju linearno ovisan o brzini vrtnje motora, nije moguće realizirati njegovu skokovitu promjenu. Uz pretpostavku da se moment tereta može mijenjati skokovito, dani su odzivi brzine vrtnje i armaturne struje motora (slika 21.) uz isto podešenje regulatora kao za slučaj razmatranja odziva na promjenu upravljačke veličine brzine vrtnje motora.

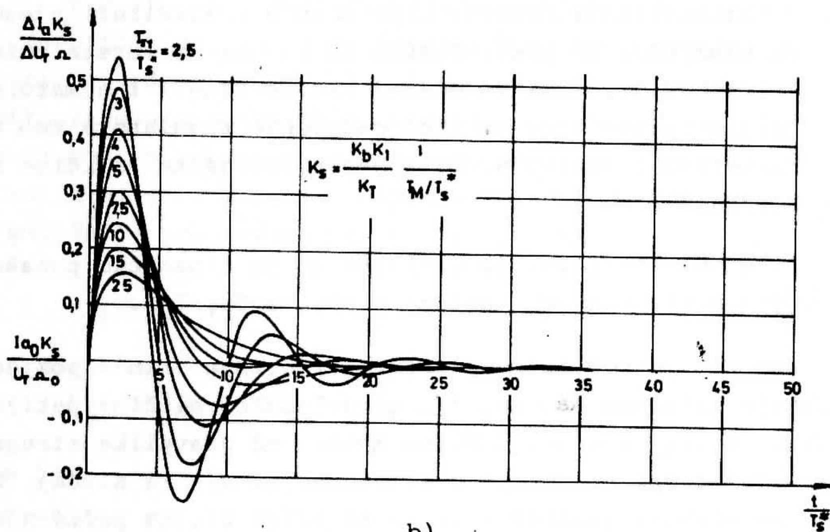
Iz slika 20. i 21. je vidljivo da je dinamičko ponašanje regulacijskog sistema jako ovisno o odnosu T_{I1}/T_s^*.

Kao što je već rečeno, regulator brzine vrtnje posjeduje ograničenje izlaznog napona, tj. upravljačke veličine petlje armaturne struje, u svrhu zaštite motora od prevelike struje. Tipični odzivi brzine vrtnje i armaturne struje za slučaj "brzog zaleta" na strujnu granicu dani su na slici 22. uz podešenje regulatora brzine prema relacijama (15a) i (17a).

Sva dosadašnja razmatranja su se bazirala na zanemarenju utjecaja petlje protuelektromotorne sile E motora na dinamičko ponašanje regulacijske petlje armaturne struje. U dodatku 3.4 detaljno je obrazložena opravdanost tog zanemarenja.

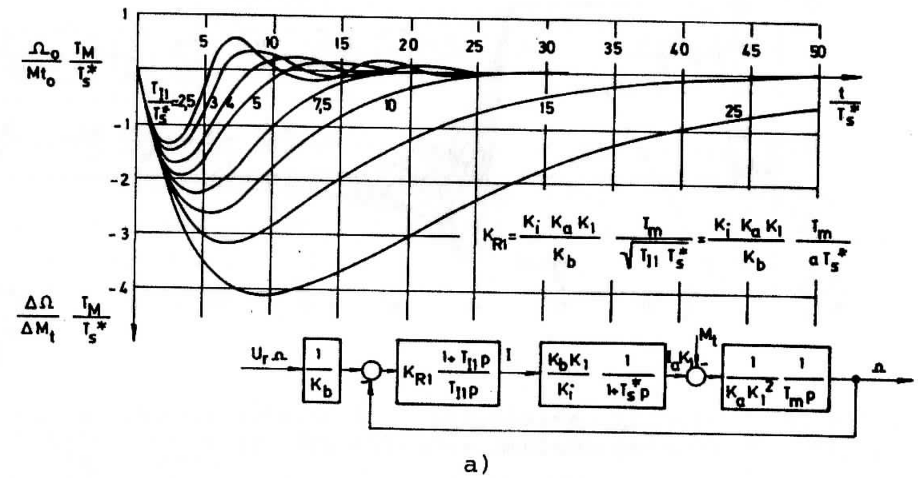


a)

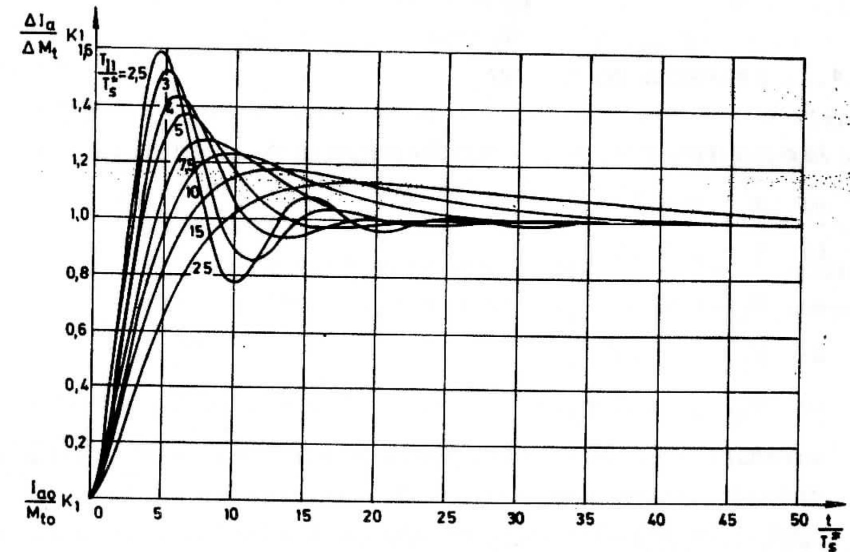


b)

Slika 20. *Odzivi brzine vrtnje a) i armaturne struje motora b) na skokovitu promjenu upravljačke veličine* $U_{r\Omega}$

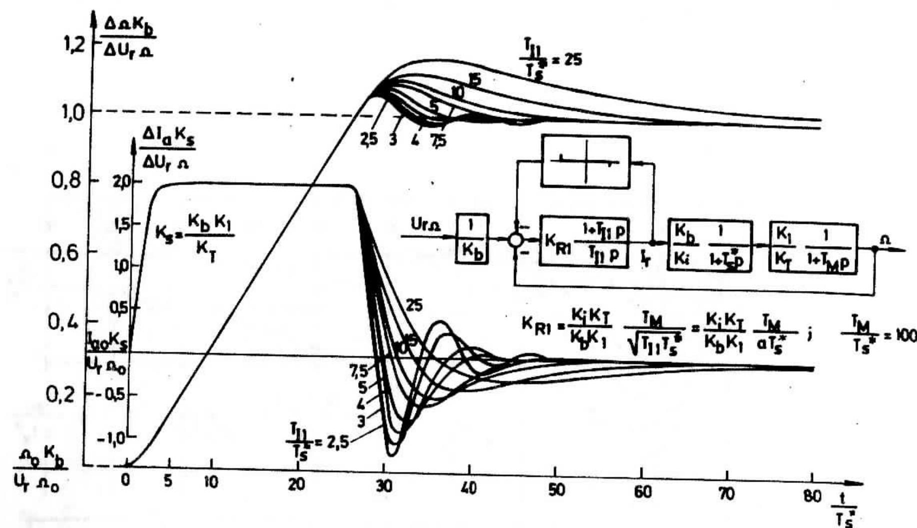


a)



b)

Slika 21. *Odzivi brzine vrtnje a) i armaturne struje motora b) na skokovitu promjenu momenta tereta* M_t



Slika 22. Utjecaj ograničenja na dinamičko ponašanje regulacijskog sistema (strujna granica $I_{asg}=2\ I_{an}$)

2.4.1. PRIPREME ZA VJEŽBU

1. Ako je integralna vremenska konstanta regulatora brzine:

   a) $T_{I1} = 0,5\ T_M$,

   b) $T_{I1} = 0,75\ T_M$,

   c) $T_{I1} = 1,00\ T_M$,

   d) $T_{I1} = 1,25\ T_M$,

   e) $T_{I1} = 1,50\ T_M$,

   odrediti pojačanje regulatora brzine vrtnje K_{R1} tako da nadvišenje iznosi kao u točci 3. priprema za vježbu 2.3.

   Uputa: Za odredjivanje pojačanja koristiti Bodeov prikaz frekvencijske karakteristike i upute date u vježbi 2.3.

2. Izračunati vrijeme prvog maksimuma odziva t_m.

3. Usporediti rezultate za K_{R1} i t_m s rezultatima dobivenim u vježbi 2.3, točke 3. i 4.

4. Izračunati pojačanje i integralnu vremensku konstantu regulatora brzine vrtnje prema relacijama (45).

   Napomena: Korekcijske faktore k_1 i k_2 odrediti iz dijagrama danih na slici 13, za odnos T_M/T_s^* (umjesto T_a/T_Σ). Koeficijent K_T odrediti prema relaciji (1-29) za, npr, nominalne podatke generatora.

5. Iz vrijednosti parametara regulatora brzine vrtnje izračunatih u točci 4, odrediti fazno osiguranje γ iz Bodeovog prikaza frekvencijske karakteristike, te izračunati približnu vrijednost nadvišenja u odzivu σ_m.

ZADATAK

1. Podesiti pojačanje i integralnu vremensku konstantu regulatora brzine vrtnje na vrijednosti odredjene u točci 1. priprema za vježbu. Snimiti odziv brzine vrtnje i armaturne struje motora na skokovitu promjenu namještene vrijednosti brzine vrtnje.

   Napomena: Regulator armaturne struje podesiti kao u vježbi 2.3. Skokovitu promjenu namještene vrijednosti brzine vrtnje odabrati malog iznosa.
   Zbog čega?
   Motor dovoljno opteretiti da se postigne kontinuirano vodjenje (po mogućnosti i u prijelaznom procesu).

2. Iz oscilograma odziva brzine vrtnje odrediti: σ_m, t_1, t_m i t_p, te ih usporediti s rezultatima dobivenim u pripremi za vježbu.

3. Postaviti pojačanje i integralnu vremensku konstantu regulatora brzine vrtnje na vrijednosti odredjene u točci 4 priprema za vježbu. Snimiti odziv brzine vrtnje i armaturne struje motora na skokovitu promjenu namještene vrijednosti brzine vrtnje.

4. Odrediti iste vrijednosti kao u zadatku 2, te ih usporediti s rezultatima dobivenim u pripremi za vježbu.

5. Uz iste vrijednosti parametara regulatora kao u zadatku 1 snimiti odziv brzine vrtnje i armaturne struje motora na skokovitu promjenu momenta opterećenja.

6. Iz odziva brzine vrtnje odrediti: σ_m, t_1, t_m i t_p.

7. Uz podešenje regulatora kao u zadatku 3 snimiti odziv brzine vrtnje i armaturne struje na skokovitu promjenu momenta opterećenja.

8. Odrediti iste veličine kao u zadatku 6, te ih s istim usporediti.

3. DODATAK

3.1. OPĆA SVOJSTVA KASKADNE REGULACIJE

Postoji više razloga koji su afirmirali princip kaskadne regulacije, a navedeni su u slijedećim točkama:

1. Sinteza regulacijskog uredjaja za sisteme s jednom povratnom vezom i složenim objektom regulacije može biti vrlo teška, a ponekad i nemoguća s obzirom na postavljene zahtjeve i radne uvjete u industrijskim procesima. Pri tome se prvenstveno misli na objekte regulacije s više integralnih članova ili pak na objekte koji su izloženi jakom utjecaju smetnji, te se ne mogu koristiti derivacijski korekcijski članovi. Dodavanjem unutrašnjih povratnih veza, te korištenjem kaskadne regulacije, moguće je promijeniti strukturu sistema regulacije, tj. podijeliti je u više podsistema te problem sinteze riješiti u više koraka, koristeći jednostavne regulacijske petlje.

2. Smetnje koje djeluju na unutrašnje petlje brže se kompenziraju i praktički su bez utjecaja na vanjske (nadredjene) petlje.

3. Ako je nekoj značajnoj veličini regulacijskog sistema pridružen vlastiti regulator, njena se vrijednost ograničava na jednostavan način ograničenjem namještene vrijednosti te veličine (referentne veličine regulatora).

4. Podešavanje regulacijskog uredjaja vrši se jednostavno, korak po korak, što je naročito bitno kod složenijih sistema.

5. Djelovanje nelinearnih ili nestacionarnih članova znatno je ograničeno korištenjem kaskadne regulacije. Unutrašnja petlja s jediničnom povratnom vezom s regulatorom koji ima integralnu komponentu ima pojačanje jedan, bez obzira da li su svi prijenosni članovi potpuno linearni.

Imajući u vidu ove prednosti, te mogućnost brzog i sistematičnog projektiranja (sinteze) regulacijskih petlji, eventualne mane kaskadne regulacije gube na važnosti. Te mane su:

1. Za svaku regulacijsku petlju je potreban poseban regulator s pripadnim mjernim članom.

2. Iako je kompenzacija utjecaja smetnji, koje djeluju unutar podredjenih regulacijskih petlji, brza, to nije slučaj za slijedjenje upravljačke veličine vanjskih nadredjenih regulacijskih petlji, te se zbog toga moraju koristiti dodatni korekcijski članovi sistema (npr. nelinearni članovi).

3.2. NEKI POJMOVI VEZANI ZA OPERACIONO POJAČALO

Struji koja teče u operaciono pojačalo uslijed konačnog ulaznog otpora superponira se još jedna konstantna struja, a koja se sastoji od tzv. prosječne ulazne struje mirovanja (input bias current, eng; Eingangruhestrom, njem.) i struje namještanja (input offset current, eng; Offsetstrom, njem.).

Ulazna struja mirovanja se definira kao:

$$I_B = \frac{I_+ + I_-}{2} \quad \text{za} \quad U_+ = U_- = 0. \qquad (3-1)$$

Struja namještanja se definira kao:

$$I_O = I_+ - I_- \quad \text{za} \quad U_+ = U_- = 0. \qquad (3.2)$$

Ove veličine su reda veličine nA.

Za realna operaciona pojačala obično nije izlazni napon nula iako je $U_+ = U_- = 0$. Stoga se definira ulazni napon namještanja U_O (input offset voltage, eng; Offsetspannung, njem.) kao razlika napona koja se mora narinuti izmedju ulazâ da bi izlazni napon postao nula:

$$U_O = U_+ - U_- \quad \text{za} \quad U_2 = 0. \qquad (3-3)$$

Kod realnih operacionih pojačala nastaju smetnje prouzročene driftom (posmakom) napona namještanja:

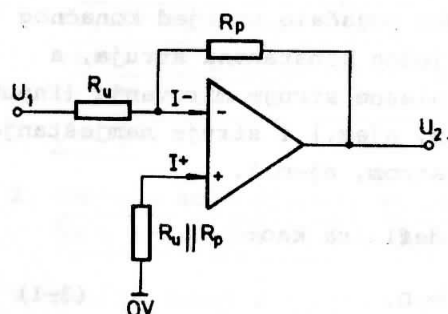
$$U_O\ (\chi, t, U) = \frac{\partial U_O}{\partial \chi} \Delta\chi + \frac{\partial U_O}{\partial t} \Delta + \frac{\partial U_O}{\partial U} \Delta U, \qquad (4-4)$$

gdje je:

χ - temperatura,
t - vrijeme,
U - napon napajanja.

3.2.1. KOMPENZACIJA ULAZNE STRUJE MIROVANJA I NAPONA NAMJEŠTANJA

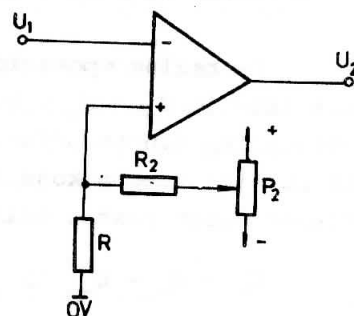
Relacija (1-62) vrijedi uz pretpostavku da je ulazna struja mirovanja nula što naravno nije slučaj za realna operaciona pojačala. Naime, u pojačalo utječe struja $I_+ = I_- = I_B$ koja uzrokuje, ovisno o veličini otpora na + i - ulazima, različito velike padove napona, čija razlika djeluje kao dodatni napon. Zbog toga se + ulaz pojačala ne spaja direktno na masu, nego preko otpornika čija je vrijednost otpora jednaka unutrašnjem otporu mreže gledano za ulaz (slika 3.1). Ulazna struja mirovanja stvara na obim ulazima pad napona $I_+(R_u || R_p)$, odnosno $I_-(R_u || R_p)$. Pri tome je $I_+ = I_-$.



Slika 3.1. Kompenzacija ulazne struje mirovanja

Jedino još struja namještanja $I_o = I_+ - I_-$, koja iznosi oko 5 nA, uzrokuje naponsku razliku, koja je utoliko manja ukoliko se sklop dimenzionira kao niskoomski.

Kompenzacija napona namještanja vrši se na način prikazan na slici 3.2. Otpornik R je dimenzioniran kao na slici 3.1, dok se R_2 odabire srazmjerno velik prema R.

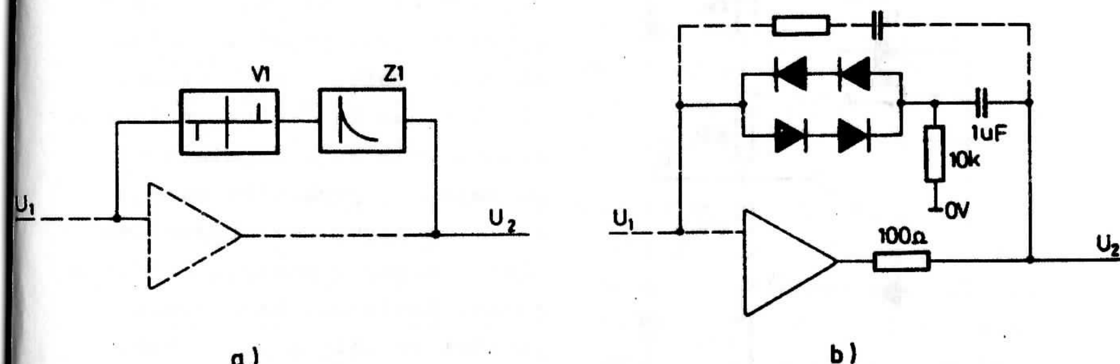


Slika 3.2. Kompenzacija napona namještanja

3.3. DODATNE POVRATNE VEZE POJAČALA REGULATORA BRZINE VRTNJE

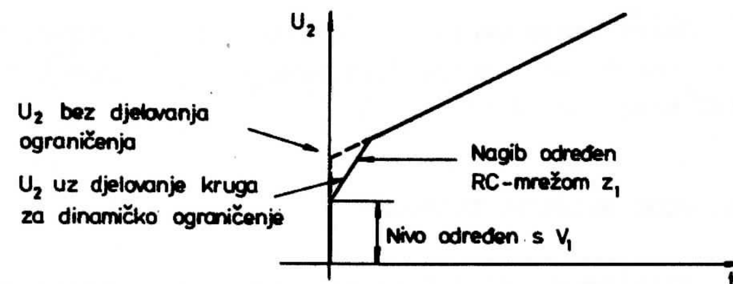
3.3.1. POVRATNA VEZA ZA OGRANIČENJE BRZINE PROMJENE IZLAZNOG NAPONA REGULATORA

Prilikom starta, te naglih promjena brzine vrtnje elektromotornog pogona, naročito su opterećene osovine i spojke zbog torzionih naprezanja. Da bi se to izbjeglo, koristi se povratna veza čiji je simbolički prikaz i elektronička izvedba dan na slici 3.3. Kod promjene izlaznog napona U_2 toliko velike da je



Slika 3.3. Prikaz dinamičkog ograničenja izlaznog napona a) i njegova elektronička izvedba b)

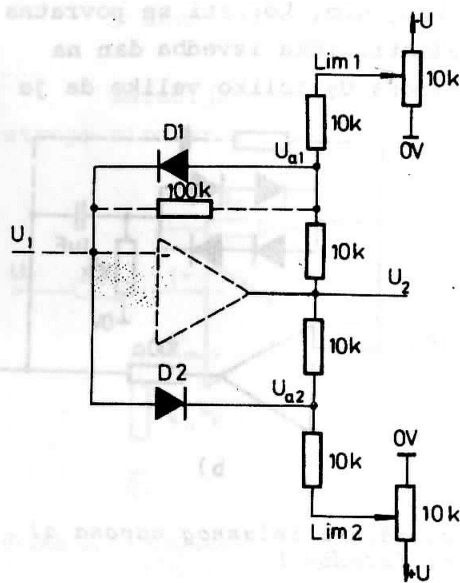
njen iznos veći od pada napona na diodama V_1 (oko 1 V), djelovat će ova dinamička povratna veza koja smanjuje pojačanje regulatora (slika 3.4.).



Slika 3.4. Odziv regulatora brzine vrtnje na skokovitu promjenu ulaznog napona

3.3.2. POVRATNA VEZA ZA OGRANIČENJE IZLAZNOG NAPONA REGULATORA

Izlazni napon regulatora brzine vrtnje predstavlja upravljačku (referentnu) vrijednost regulatoru armaturne struje. Zbog toga je vrlo važno da se ova struja može ograničiti u svrhu zaštite cjelokupnog pogona. Jedna od izvedbi ograničenja struje armature prikazana je na slici 3.5. Kada napon U_2 poprimi pozitivnu vrijednost tolikog iznosa da napon U_{a1} postane pozitivan i veći od naponskog praga diode, provede dioda D_1, te se u povratnu vezu pojačala uključi otpornik malog iznosa otpora (10 KΩ). Na taj se način znatno smanji pojačanje regulatora, pa napon U_2 praktički ostaje na istom nivou bez obzira što ulazni napon eventualno i dalje raste. Analogno, kada napon U_2 poprimi negativan iznos takav da U_{a2} postane negativan i po iznosu veći od naponskog praga diode, provede dioda D_2. Potenciometri za ograničenje izlaznog napona s oznakama Lim_1 i Lim_2 mogu se priključiti na fiksni stabilizirani naponski izvor (± 11 V) ili pak na neki vanjski upravljački napon.



Slika 3.5. Ograničenje izlaznog napona regulatora

Ograničenje ispravljenog napona tiristorskog ispravljača vrši se pomoću regulatora armaturne struje (EALB 215) koji ima dodatni krug kao na slici 3.5.

3.3.3. BLOKIRANJE REGULATORA

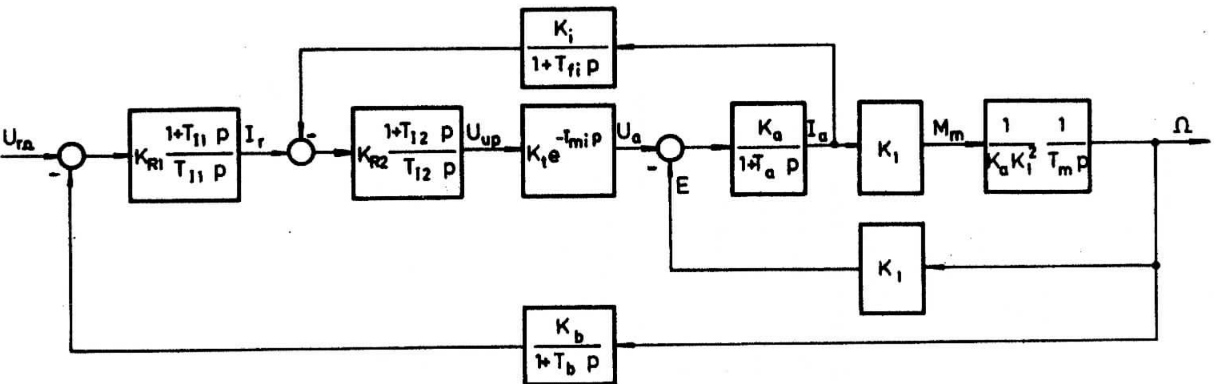
Blikiranje regulatora vrši se kratkim spajanjem RC-mreže u povratnoj vezi pojačala, što se izvodi aktiviranjem odgovarajućeg releja d_1 (slika 1.33.).

3.4. UTJECAJ ZANEMARENOG DJELOVANJA PETLJE ELEKTROMOTORNE SILE E NA REGULACIJSKU PETLJU ARMATURNE STRUJE

Za procjenu utjecaja zanemarene petlje elektromotorne sile E motora potrebno je usporediti frekvencijske karakteristike regulacijske petlje struje zakočenog i nezakočenog motora u praznom hodu. U tu svrhu prikažimo blokovsku shemu sistema regulacije brzine vrtnje (slika 3.6.a) u transformiranom obliku (slika 3.6.b). Iz slike 3.6.b) je vidljivo da je nadredjena regulacijska petlja (petlja III) identična s do sada promatranom regulacijskom petljom brzine vrtnje, ako se petlje I i II predstave jednim blokom. Prema tome je dovoljno usporediti frekvencijske karakteristike regulacijske petlje struje sa i bez uzimanja u obzir petlje elektromotorne sile E.

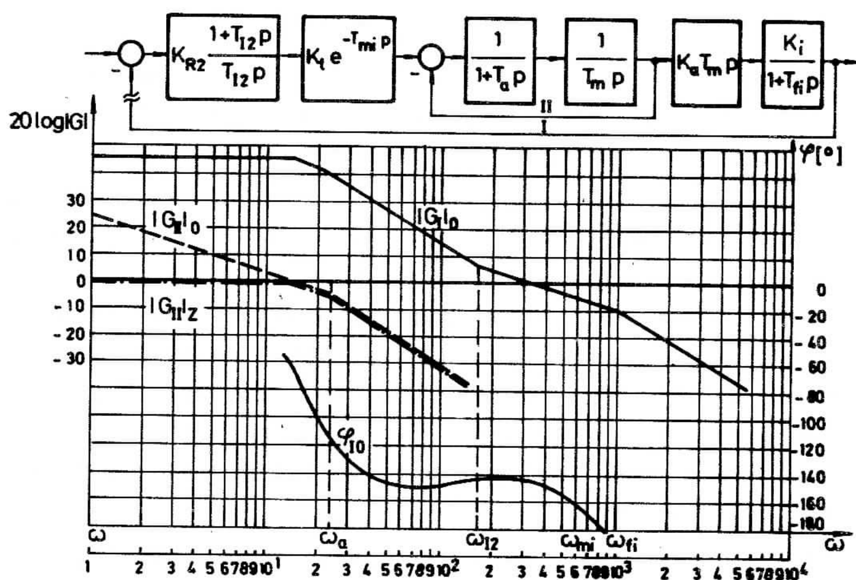
Frekvencijska karakteristika otvorene regulacijske petlje struje $|G_I|_o$ prikazana je na slici 3.7. Amplitudnu i faznu frekvencijsku karakteristiku zatvorene petlje elektromotorne sile jednostavno dobivamo iz Bodeovog prikaza frekvencijske karakteristike otvorene petlje, koristeći se Nicholsovim dijagramom. Kao što je vidljivo sa slike 3.7., amplitudna frekvencijska karakteristika zatvorene petlje elektromotorne sile $|G_{II}|_z$ podudara se s amplitudnom frekvencijskom karakteristikom otvorene petlje elektromotorne sile $|G_{II}|_o$ u području srednjih i visokih frekvencija.

Frekvencijska karakteristika otvorene regulacijske petlje struje $|G_I|_o$ nezakočenog motora je identična s frekvencijskom karakteristikom otvorene regulacijske petlje struje zakočenog motora (slika 17.) u okolišu frekvencije presjeka. Odstupanja nastaju tek za $\omega<\omega_a$, što je posljedica utjecaja elektromotorne sile E. Prema tome je dozvoljeno zanemariti petlju elektromotorne sile prilikom razmatranja dinamičkog ponašanja regulacijske petlje armaturne struje.



a)

Slika 3.6. Blokovska shema regulacije brzine vrtnje a) i njen transformirani oblik b)



Slika 3.7. Frekvencijska karakteristika otvorene regulacijske petlje armaturne struje nezakočenog motora

3.5. PRAKTIČNE UPUTE ZA PODEŠAVANJE REGULACIJSKOG UREDJAJA BRZINE VRTNJE MOTORA

Čest je slučaj da se prilikom puštanja u rad elektromotornog pogona ne znaju dinamički parametri reguliranog motora (npr. T_a i T_m). Zbog toga je korisno dati upute kako u tom slučaju pristupiti podešavanju regulacijskog uredjaja.

3.5.1. PODEŠAVANJE REGULACIJSKE PETLJE ARMATURNE STRUJE MOTORA

Podešavanje regulacijske petlje armaturne struje motora treba vršiti slijedećim redoslijedom:

1. Zakočiti motor i odspojiti napajanje uzbudnog kruga motora.
2. Regulator brzine vrtnje izabrati čistog proporcionalnog djelovanja s pojačanjem jedan (prespojen kondenzator u grani

povratne veze pojačala regulatora brzine).

3. Regulator armaturne struje odabrati čistog proporcionalnog djelovanja s pojačanjem $K_{R2} \doteq 0,1$ (prespojen kondenzator u grani povratne veze pojačala regulatora struje).

4. Provjeriti da li je povratna veza regulacijske petlje armaturne struje negativna. To se postiže na taj način da se na ulaz regulatora brzine vrtnje narine kratkotrajni naponski impuls, te se istovremeno mjeri naponski signal odspojene povratne veze petlje armaturne struje. Ako su polariteti obaju napona isti, povratna veza je negativna. U protivnom je potrebno promijeniti polaritet napona povratne veze petlje armaturne struje. Poslije toga spojiti povratnu vezu petlje armaturne struje.

5. Podesiti ograničenje armaturne struje pomoću regulatora brzine vrtnje. To se postiže na slijedeći način:
   a) Postaviti pojačanje regulatora armaturne struje na iznos $K_{R2} \doteq 0,1$, a integralnu vremensku konstantu $T_{I2} \doteq 50$ ms.
   b) narinuti na ulaz regulatora brzine vrtnje napon od npr. 5 V.
   c) mjeriti armaturnu struju motora i podešavati potenciometrom za prilagodjavanje napona povratne veze pojačanje grane povratne veze K_i sve dotle dok se ne dobije nominalna armaturna struja motora.

Na taj način se postiglo da izlaznom naponu regulatora brzine vrtnje od 5 V odgovara nominalna armaturna struja. Izlaznom naponu regulatora brzine vrtnje od 10 V odgovarala bi armaturna struja dvostrukog nominalnog iznosa. U praksi se obično dozvoljava da se armaturna struja ograničava na iznos do 1,5 I_{an}, što odgovara izlaznom naponu regulatora brzine vrtnje od 7,5 V. Ograničenje pozitivnog i negativnog izlaznog napona regulatora brzine vrtnje vrši se pomoću pripadnih potenciometara Lim 1 i Lim 2 (potpoglavlje 3.3.2).

6. Prespojiti kondenzator u povratnoj vezi pojačala regulatora struje, a pojačanje povećavati sve dotle dok se ne dobije približno granični aperiodski slučaj odziva na skokovitu promjenu upravljačke veličine.

<u>Napomena:</u> Kod ovog podešavanja je poželjno raditi s malim strujama (npr. $I_a \doteq 0,1\ I_{an}$), te povremeno (npr. svakih 5 sec.) zakrenuti osovinu motora da ne bi došlo do zagrijavanja lamela kolektora.

7. Spojiti kondenzator u povratnu vezu pojačala regulatora struje i mijenjati njegov kapacitet sve dotle dok se ne dobije prebačaj u odzivu struje na skokovitu promjenu upravljačke veličine do maksimalno 10%. Pri tome i dalje vrijedi napomena dana u točci 6.

8. Podesiti potenciometrima za ograničenje izlaznog napona regulatora armaturne struje Lim 1 i Lim 2 maksimalno i minimalno dozvoljeni kut kašnjenja vodjenja α. Time se ograničava ispravljeni napon usmjerivača na dozvoljeni armaturni napon motora. Energetski dio sistema je obično tako projektiran da se potenciometri za ograničenje izlaznog napona regulatora struje trebaju postaviti na ograničenje ± 10 V. Poslije podešavanja regulatora armaturne struje prilazi se podešavanju regulatora brzine vrtnje.

3.5.2. PODEŠAVANJE REGULACIJSKE PETLJE BRZINE VRTNJE MOTORA

Podešavanje regulacijske petlje brzine vrtnje motora treba vršiti slijedećim redoslijedom:

1. Priključiti napajanje uzbudnog kruga motora i motor otkočiti.

2. Regulator brzine vrtnje odabrati čistog proporcionalnog djelovanja s pojačanjem jedan.

3. Provjeriti da li je povratna veza regulacijske petlje brzine vrtnje negativna. To se postiže na taj način da se na ulaz regulatora brzine vrtnje narine kratkotrajni impuls, te se istovremeno mjeri naponski signal odspojene povratne veze petlje brzine vrtnje. Ako su polariteti obaju napona različiti, povratna veza je negativna. Ako to nije slučaj, potrebno je promijeniti polaritet napona povratne veze petlje brzine vrtnje. Poslije toga spojiti povratnu vezu petlje brzine vrtnje.

4. Podesiti pojačanje grane povratne veze brzine vrtnje. To se postiže na slijedeći način:
   a) postaviti pojačanje regulatora brzine vrtnje na iznos $K_{R1}=1\div5$, a integralnu vremensku konstantu $T_{I1}=100\div500$ ms,
   b) narinuti na ulaz regulatora brzine vrtnje napon od npr. 10 V,
   c) mjeriti brzinu vrtnje motora (npr. pomoću ručnog tahometra), te podešavati potenciometrom za prilagodjenje napona povratne veze pojačanje grane povratne veze K_b sve dotle dok se ne dobije nominalna brzina vrtnje motora. Na taj način se postiglo da upravljačkoj veličini regulacijske petlje brzine vrtnje od 10 V (obično maksimalni iznos) odgovara nominalna brzina vrtnje motora.

5. Podesiti pojačanje i integralnu vremensku konstantu regulatora brzine vrtnje.
   Prilikom podešavanja regulatora brzine vrtnje motora moraju se imati u vidu tehnološke potrebe kojima mora udovoljiti regulirani pogon. Naime, za veliki broj pogona dozvoljava se da prebačaj u odzivu brzine vrtnje na skokovitu promjenu upravljačke veličine brzine vrtnje motora smije iznositi do 10%, uz istovremeno najkraće moguće vrijeme porasta odziva. To su uglavnom pogoni kod kojih se vremenski mijenja upravljačka veličina brzine vrtnje (npr. slijedni i pozicioni sistemi). Nasuprot pomenutim pogonima, za pogone čija se namještena (upravljačka) veličina ne mijenja tokom dužeg vremena dozvoljava se da prebačaj u odzivu brzine na skokovitu promjenu upravljačke veličine brzine vrtnje smije iznositi do 40%, uz istovremeno najkraće moguće vrijeme porasta odziva. Karakteristika podešenja regulatora za dozvoljeni veći iznos prebačaja u odzivu je da se brzo kompenzira utjecaj smetnji (npr. momenta opterećenja), tako da brzina vrtnje motora ostaje praktički nepromijenjena. Tipični predstavnici ovakvih pogona su pogoni u papirnoj i tekstilnoj industriji, te pogoni valjaoničkih postrojenja. Veliki prebačaj u odzivu može pak prouzročiti mehanička oštećenja postrojenja, te se zbog toga obično ugradjuje u granu namještene vrijednosti brzine vrtnje odgovarajući filter, koji predstavlja ograni-

čenje porasta namještene vrijednosti, te se bitno smanji prebačaj u odzivu brzine vrtnje. Pri tome je i dalje očuvano dinamičko svojstvo brze kompenzacije utjecaja smetnji.

5.1. Podešavanje pojačanja regulatora brzine vrtnje za prebačaj do 10% vrši se tako da se uz prespojeni kondenzator u povratnoj vezi pojačala regulatora brzine vrtnje povećava pojačanje sve dotle dok se ne dobije približno aperiodski odziv brzine vrtnje na skokovitu promjenu namještene vrijednosti brzine vrtnje motora. Pri tome je neophodno da skokovita promjena namještene vrijednosti bude dovoljno malog iznosa, kako ne bi niti jedan dio sistema došao u jako nelinearno područje, tj. ne smije doći niti jedno pojačalo u područje ograničenja. Naročito treba paziti da pojačalo regulatora brzine ne dodje u područje ograničenja, pošto njegovo pojačanje u stabilnom režimu rada može imati relativno veliku vrijednost ($10\div50$). Zbog toga se preporuča istovremeno promatrati odzive brzine vrtnje i izlazni napon regulatora brzine.

5.2. Kada se završilo s podešavanjem pojačanja regulatora brzine vrtnje, uvodi se integralna komponenta regulatora. Integralna vremenska konstanta regulatora se smanjuje sve dotle dok se ne dobije prebačaj u odzivu na skokovitu promjenu upravljačke veličine do 10%.

5.3. Podešavanje pojačanja regulatora brzine vrtnje za prebačaj do 40% vrši se na isti način i uz iste predostrožnosti kao za podešavanje pojačanja za prebačaj do 10%, s tim da se prebačaj u odzivu s čistim proporcionalnim regulatorom brzine podesi na iznos do 20%.

5.4. Podešavanje integralne vremenske konstante regulatora brzine vrtnje vrši se na analogan način kao za slučaj prebačaja u odzivu do 10%, s tim da se integralna vremenska konstanta smanjuje sve dotle dok se ne dobije prebačaj u odzivu brzine do 40%.

Sistem regulacije brzine vrtnje može biti nestabilan zbog dva razloga i to:

1. Preveliko pojačanje regulatora brzine vrtnje. Pri tome nastupaju brze oscilacije (oko 10 Hz) u signalu brzine vrtnje. Da bi se otklonile te oscilacije nužno je smanjiti pojačanje regulatora brzine vrtnje.
2. Premala integralna vremenska konstanta regulatora brzine vrtnje. Pri tome nastupaju spore oscilacije (1-2 Hz) u signalu brzine vrtnje. Otklanjanje ovih oscilacija vrši se tako da se povećava pojačanje regulatora dok sistem ne dodje u manje oscilatorno područje, a potom se poveća integralna vremenska konstanta dok ne isčeznu oscilacije.

POPIS LITERATURE

1. *A. Buxbaum, K. Schierau:* Berechnung von Regelkreisen der Antriebstechnik. Elitera-Verlag, Berlin, 1974.
2. *P. Crnošija:* Analiza nelinearnog regulacijskog kruga. Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet u Zagrebu, 1973.
3. *B.K. Čemodanov:* Sljedjašćije privodi I, II. Energija, Moskva 1976.
4. *J. Černelč, N. Pašalić:* Automatska regulacija električnih strojeva I. Skripta, 1973.
5. *J. Langhoff, E. Raatz:* Geregelte Gleichstromantriebe. Elitera-Verlag, Berlin, 1977.
6. *W. Leonhard:* Einführung in die Regelungstechnik-Lineare Regelvorgänge. 2. Aufl. Braunschweig, 1972.
7. *W. Leonhard:* Regelung in der elektrischen Antriebstechnik. Stuttgart, 1974.
8. *A. Netushil:* Theory of automatic control. Mir publichers Moscow, 1973.
9. *U. Tietze, Ch. Schenk:* Halbleifer-Schaltungstechnik. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. New York, 1974.